

SAE Leipzig

Alexander Helm (Hochschulleiter)

AEDS 1207

Diplomarbeit

Physiologie des Gehörs und Auditive Wahrnehmung beim Menschen

Vorgelegt von: **Benjamin E.G. Gruber**

geboren am: **12. Juli 1984** in: **Rodewisch**

Betreuer: **Thoralf Kuhl**

Verantwortlicher Hochschullehrer: **Joachim Theiss**

Tag der Einreichung: **03. Apr. 2009**

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Bsp.	Beispiel
ca.	circa
cm	Zentimeter - ein zentel Meter (1/10 m)
d.h.	das heißt
de.	deutsch
en.	englisch
etc.	lat.: et cetera de.: im Übrigen
evtl.	eventuell
Hz	Hertz - pro Sekunde (1/s)
kHz	Kilohertz - 1000x pro Sekunde (1000 x 1/s)
lat.	lateinisch
lt.	laut
m	Meter
mg	Milligramm - eintausendstel Gramm (1/1000 g)
mm	Millimeter - eintausendstel Meter (1/1000 m)

period.	periodisch
s	Sekunde(n)
S.	Seite
sog.	sogenannte(r/s/n)
SPL	en.: Sound Pressure Level de.: Schalldruck
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem
°	Grad
°C	Grad Celsius

Abbildungsverzeichnis

Einleitung

Man hört nicht mit dem Ohr allein

Was ist Schall eigentlich wirklich? Wie entsteht der Höreindruck und wozu ist unser Gehör, aber *vorallem* unser Gehirn fähig? Ist nicht zuletzt das, was wir hören alles nur reine Kopfsache?

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Grundvorraussetzung des Tontechnikers. Ohne sie wäre die Welt ein akustisches Vakuum. Einer unserer Sinne, der viel zu oft unterschätzt wird. Die Rede ist von

AUDITIVER WAHRNEHMUNG

„Die auditive Wahrnehmung erfolgt durch die Aufnahme von Schallereignissen, deren Weiterleitung über die zentrale Hörbahn, in der bereits eine Vorverarbeitung stattfindet und ihre kognitive Verarbeitung in Form von Speicherung, Differenzierung, Analyse, Synthese, Ergänzung und Integration akustischer Strukturen. Diese werden unterteilt in Klang, Lautstärke, Tonhöhe, usw."[1] Im Zusammenhang zur AUDITIVEN WAHRNEHMUNG müssen die Begriffe *auditiv* und *akustisch* von einander unterschieden werden.

Akustik

als die Lehre vom Schall und Schallverhältnissen. Die davon abgeleiteten Begriffe meinen den physikalischen Reiz.

[1] STREPP (2006) S. 39

Auditiv

bezeichnet die anatomischen Grundlagen und die physiologischen Prozesse des Hörvorgangs. Man spricht also von AUDITIVER WAHRNEHMUNG aber von akustischen Reizen.[2]

In den nun folgenden Kapitel soll aufgezeigt werden, wie das ganze auditive System aufgebaut ist. Physikalische Grundlagen helfen beim Veständis über anatomische Funktionen des Gehörapparates. Welche Vorgänge laufen beim Hören ab? Wie werden die Informationen verabeitet? Das soll Gegenstand dieser Arbeit sein.

Erläuterung

Als auditive, aurale oder akustische Wahrnehmung bezeichnet man die Sinneswahrnehmung von Schall durch Lebewesen. Zur Wahrnehmung des Schalls dienen Sinnesorgane, die durch Schwingungen aus der Umgebung des Lebewesens[3] stimuliert werden.

Die Schwingungen können über das Umgebungsmedium (Luft, Wasser) oder über den Untergrund (Vibrationen) übertragen werden. Der Hörsinn ist nicht immer an Ohren gebunden, insbesondere Vibrationen können auch durch Sinnesorgane an entsprechenden Körperteilen wahrgenommen bzw. empfunden werden.

Auditive Wahrnehmung beschreibt den Vorgang des Hörens und in welcher Form Schall von Lebewesen wahrgenommen wird, also z. B. die Hörereignisse, die bei bestimmten Schallereignissen entstehen.

Für die Wahrnehmung von Richtungen und das Hören in eine bestimmte Richtung sind zwei Sinnesorgane notwendig. Alleine mit Hilfe beider Ohren kann auch die Bewegung von Schallquellen verfolgt werden. Es erfolgt Auswertung von der aufgenommen Reize und ihre Interpretation. Daraus entstehen Wahrnehmungen, wie das Hören unterschiedlicher Frequenzen oder die Lokalisation von Schallereignissen.

[2] vgl. LUPBERGER (2007) S.11
[3] STRAUSS (2001)

Teil I

Allgemeines & Grundlagen

1 Kapitel 1
Akustik

1.1 Der Schall

Schall oder auch Schwingung[1] kann abhängig vom Ausbreitungsmedium unterschiedlich beschrieben werden. Luftschall (Gas), Wasserschall (Flüssigkeit) oder Körperschall (Festkörper). Wichtig ist nur, dass das Medium die Eigenschaft SCHALLLEITDEND[2] und nicht SCHALLHART besitzt. Im weiteren Verlauf wollen wir unser Hauptaugenmerk auf den Luftschall richten, da wir Menschen den Schall primär durch das gasförmige Medium wahrnehmen. Abhängig von der Frequenz können wir dann den HÖRSCHALL zwischen „16Hz und 16kHz"[3] wahrnehmen. Frequenzen jenseits dieser Werte sind für uns nicht mehr hörbar. Wellenlängen unterhalb 16Hz werden als INFRASCHALL und Frequenzen über 16kHz als ULTRASCHALL bezeichnet. Jenseits des Ultraschalls gibt es noch den sog. HYPERSCHALL, welcher bei bei $10^9 Hz$ seine Untergrenze besitzt.

Schall kann auftreten als:

Ton auch reiner Ton; sinusförmige Schwingung mit nur einer Frequenz

Tongemisch mehrere Töne unterschiedlicher Frequenzen

Klang Schall mit Grund- und Obertonstrukturen

[1] lt.CHLADNI (1802) S. 215
[2] vgl. STAUDER (1973) S. 31
[3] lt. DICKREITER (1997) S. 1

Klanggemisch Schall bestehend aus mehren Klängen mit jeweils entsprechenden Grund- und Obertonstrukturen

Schallimpuls einmaliges Schallereignis mit kurzer Dauer

Tonimpuls Ton mit kurzer Dauer

Rauschen statistisches Schallereignis, auswertbar über ein Intensitätsspektrum

Geräusch Schallsignal mit Anteilen von Rauschen, Ton- und Klanggemischen[4]

1.2 physikalische Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen des Schall werden in der Akustik beschrieben, welche im weiteren Sinne kein eigener, sondern eher ein Spezialbereich der Mechanik sind. Nüchtern betrachtet ist Schall nichts weiter als eine Welle, die sich in einem elastischen Medium ausbreitet. Ist kein Medium vorhanden, wie beispielsweise im Vakuum, so kann keine Ausbreitung stattfinden. und somit kein Schallfeld entstehen. Es ist also physikalisch unmöglich, Schall im luftleeren Raum wahrzunehmen.

1.2.1 Erläuterung Welle

Jede Welle ist mit kleinsten räumlichen und zeitlichen Schwankungen von Druck und Dichte des Ausbreitungsmediums verbunden. Man bezeichnet diesen dem atmosphärischen Ruhedruck p_0 überlagerten Wechseldruck als Schalldruck p. [5] Wellen sind an die Geschwindigkeit der um ihre Ruhelage schwingenden Teilchen gekoppelt. [6] Man spricht auch von Ketten elastisch gekoppelter Massen sog. Oszillatoren, die sich im Raum ausbreiten. Man beschreibt sie auch als Verdichtungen und Verdünnungen im Schallfeld.[7] (trifft aber nur bei Logitudinalwellen zu – dazu später mehr)

In gasförmigen und flüssigen Medien breitet sich Schall longitudinal aus, wohin gegen er sich in festen Medien weitestgehend transversal ausbreitet.

[4]vgl. DICKREITER (1997) S. 1 und HEINZ HOFFMANN (1993) S. 21
[5]vgl. MÖSER (2004) S. 1
[6]vgl. DICKREITER (1997) S. 2
[7]vgl. STAUDER (1973) S. 31

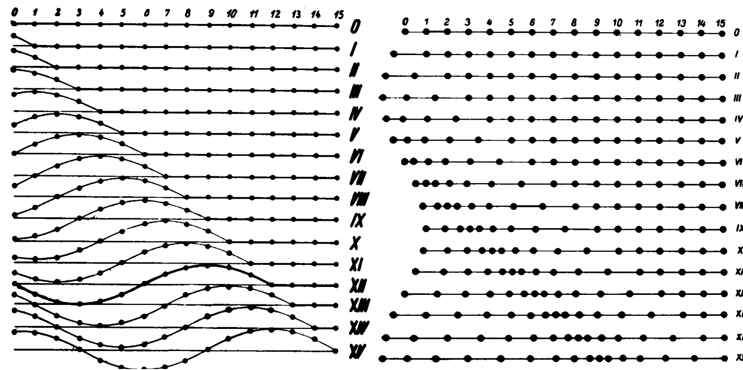


Abb. 1.1: `Transveral- & Longitudinalwelle [Quelle: S.60]`

Eine Welle, welche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt nennt man **Transversalwelle** (Abb. 1.1, linkes Bild). Die Wellen können polarisiert sein. Was bedeutet das? Nimmt man an, dass die Welle sich in x-Richtung ausbreitet und die Schwingung in der xy-Ebene erfolgt, so kann die Schwingungsrichtung (xy-Ebene) um die x-Achse gedreht werden. Eine Drehung um z.B. 90° hätte zur Folge, dass sich die Schwingung auf der xz-Ebene befände, aber dennoch senkrecht zur x-Achse stünde. Kurz zusammengefasst bedeutet dies, dass der Vektor der Schwingungsebene zirkulär oder auch ellpitisch senkrecht in z-Richtung gedreht werden kann. [8] Als linear polarisiert bezeichnet man Wellen, wenn deren Schwingung immer in einer Ebene stattfindet. Ist die Schwingungsrichtung dagegen unregelmäßig, dann bezeichnet man die Welle als unpolarisiert. [9]

Wellen, die *in* Ausbreitungsrichtung schwingen werden als **Longitudinalwellen** (Abb. 1.1, rechtes Bild) bezeichnet. Die Luftmoleküle ändern dabei periodisch ihre Bewegungsgeschwindigkeit und ihre Bewegungsrichtung.[10] In der Abbildung ist zu erkennen, dass durch die Annäherung der Moleküle ein Raum entsteht, in dem sich mehr Moleküle konzentrieren (bei Phase VI – VIII; Abb. 1.1 rechts), als im Ruhezustand (Phase 0; Abb. 1.1 rechts). Bei einer solchen Verdichtung entsteht auch eine direkte Änderung der Dichte, eine sog. Dichteschwankung von dem entsprechenden Medium. [11] Bei Phase I – III (Abb. 1.1 rechts) ist es genau anders herum. Die Moleküle bewegen sich von einander weg. Es entsteht so eine Verdünnung der Dichte.

Wichtig zu erwähnen ist, dass bei allen zwei Wellenarten kein Materietransport[12] sondern ein reiner Energietransport von kinetischen Informationen geschieht.

Die

[8] vgl. BERTELSMANN (1989) S. 354
[9] vgl. SEIBT (2003) S. 304
[10] vgl. DICKREITER (1997) S. 3
[11] vgl. SEIBT (2003) S. 304
[12] vgl. SEIBT (2003) S. 319

GESCHWINDIGKEIT [c]

des Schalls ist hauptsächlich vom Ausbreitungsmedium und dessen Beschaffenheit abhängig. Am Beispiel Luft ist der beeinflussende Faktor primär die Temperatur der Mediums. Einfluss nehmen auch Faktoren wie Luftdruck und -feuchtigkeit. Allgemein kann man aber sagen, dass die Schallgeschwindigkeit von der Dichte des Mediums abhängt.

In Luft (Gas) beträgt die Geschwindigkeit 344 m/s [13] bei 20°C Umgebungstemperatur und ändert sich 0,6 m/s pro °C. In Wasser (flüssiges Medium) sind es hierbei schon 1480 m/s [14] bei 20°C Umgebungstemperatur.

Der Abstand zwischen zwei identischen Schwingungszuständen (Phasen) wird als

WELLENLÄNGE [λ]

bezeichnet. Man geht davon aus, dass eine Schwingung einmal ein Druckmaximum (Wellenberg) und Druckminimum (Wellental) druchläuft. Der zeitliche Abstand zwischen diesen beiden gleichen Schwingungszuständen ist als

PERIODENDAUER [T]

definiert. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde heißt

FREQUENZ [f].

[13] lt. DICKREITER (1997)S. 3 und SEIBT (2003) S. 301
[14] lt. SEIBT (2003) S. 302

Diese Einheiten sind wie folgt korreliert:

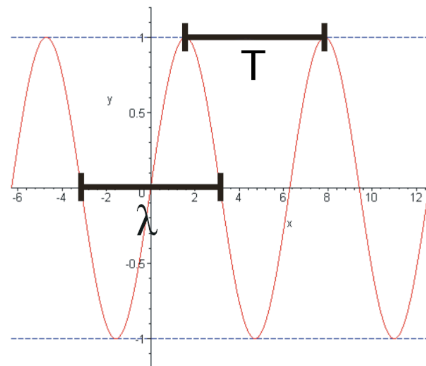


Abb. 1.2: `Wellenlänge & Periodendauer [Quelle: S.60]`

$f = \frac{1}{T}$ — f = Frequenz $[Hz]$; T = Periodendauer $[s]$

$\lambda = \frac{c}{f}$ — f = Frequenz $[Hz]$; c = Schallgeschwindigkeit $[\frac{m}{s}]$; λ = Wellenlänge $[m]$

$c = \frac{\lambda}{T}$ — c = Schallgeschwindigkeit $[\frac{m}{s}]$; λ = Wellenlänge $[m]$; T = Periodendauer $[s]$

In unterschiedlichen Medien ändert sich demnach die Wellenlänge je nach Schallgeschwindigkeit, welche u.a. abhängig vom Medium selbst, aber auch von dessen Temperatur ist.

Folgende Beispielen sollen dies näher verdeutlichen.

Bsp. a) Medium: Luft bei 20°C und einem Ton 1kHz als Frequenz

$[1kHz = 1000Hz]$

$[1Hz = 1 \cdot \frac{1}{s}]$

$c_a = 344\frac{m}{s}$

$\lambda_a = \frac{344\,m \cdot s}{1000\,s}$

$\curvearrowright \lambda_a = 0,344\,m \triangleq \underline{\mathbf{34,4\,cm}}$

Bsp. b) Medium: Luft bei 0°C und einem Ton 1kHz als Frequenz

c hat bei 0°C folgende Geschwindigkeit:

$c_b = 344\frac{m}{s} - (20 \cdot 0,6\frac{m}{s})$

$c_b = 332\frac{m}{s}$

$\lambda_b = \frac{332\,m \cdot s}{1000\,s}$

$\curvearrowright \lambda_b = 0,332\,m \triangleq \underline{\mathbf{33,2\,cm}}$

Anmerkung: *die Berechnungen von c_b beruhen auf Angaben von DICKREITER (1997) und SEIBT (2003). In einigen anderen Werken, wie z.B. von STAUDER (1973) würde aber $c_b = 331,41\frac{m}{s}$ bei 0°C betragen. Dieser Umstand wurde hierbei vernachlässigt, da DICKREITER (1997) und SEIBT (2003) die aktuelleren Werke sind und die Theorie dadurch auch mehrfach belegt ist.*

Es ergibt sich bei gleichem Medium und gleicher Tonhöhe (Frequenz), aber einem Temperaturunterschied von 20°C, eine Differenz $|\lambda_a - \lambda_b|$ von $\lambda_\Delta = 1,2cm$. Das sind $\approx 3,614\%$ Unterschied. Gravierend wird der Unterschied erst, wenn das Medium wechselt, wie z.B. in

Bsp. c) Medium: Wasser bei 0°C und einem Ton mit 1kHz als Frequenz

$c_c = 1407\frac{m}{s}$

$\lambda_c = \frac{1407\,m\cdot s}{1000\,s}$

$\curvearrowright \lambda_c = 1,407\,m \triangleq \underline{\mathbf{140,7\,cm}}$

Der Vergleich zwischen b) und c) ergibt folgendes:

Die Medien sind zwar unterschiedlich haben aber beide die gleiche Temperatur und Tonhöhen (Frequenz). Aufgrund der gravierenden Unterschiede der Schallgeschwindigkeit c beider Medien ergibt sich folgende Differenz $|\lambda_b - \lambda_c|$ zwischen den Wellenlängen des Schalls: $\lambda_\Delta = 107,5cm$

Das sind um $\approx 423,795\%$ größere Wellenlängen, als in der Luft. Daraus leitet sich folgende Erkenntis ab:

Je fester ein Medium wird (Dichte), desto höher werden die Schallgeschwindigkeiten.

Da Schall bei seiner Ausbreitung Welleneigenschaften aufweist, unterliegt er auch den gleichen Effekten wie z.B optische Wellen.

1.2.1.1 Schall-Reflexion

Die Reflexionsgesetze beim Schall entsprechen denen der Optik.[15] Trifft eine ideelle Schallwelle auf eine ebene Raumbegrenzungsfläche, so wird diese zurückgeworfen. Es gilt: der Einfallswinkel ist dem Ausfallswinkel gleich ($\alpha = \alpha'$). Dabei wird angenommen, dass bei der Reflexion - insbesondere beim Schallrückwurf - keine Verluste auftreten. Das Reflexionsgesetz gilt aber nur, wenn die Wellenlänge des Schalls λ kleiner als der Durchmesser des Hindernises d ist ($\lambda < d$).

[15] vgl. STAUDER (1973) S. 161

Konkave und konvexe Begrenzungsflächen führen zu einer ungleichen Schallverteilung. Bei konkaven Flächen - insbesondere parabolförmige - bildet sich ein akustischer Brennpunkt aus. In der Raum- und Gebäudeakustik ist dies meist sehr unvorteilhaft und wird bei akustisch relevanten Bauten - falls nicht anders möglich - vermieden.[16]

Konvexe Flächen sind sehr dienlich, wenn es um Schalldiffusion geht. Der Schall wird dabei nicht auf einen Punkt konzentriert, sondern in viele verschiedene Richtungen zurückgeworfen.

Nachhall ist ein weiteres Phänomen, das auf Reflexionen beruht. Kurz beschrieben, handelt es sich hierbei um multiple Reflexion in einem natürlich begrenzten Bereich, z.B. ein Raum mit sechs Begrenzungsflächen. Diese Reflexionen überlagern sich und es entsteht ein sog. diffuses Schallfeld (*vgl. „Schallfeld" auf Seite 13*).

Stehende Wellen auch bekannt als Raumresonanzen entstehen wenn zwei parallele Reflexionsflächen im Abstand exakt der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) oder einem ganzzahligen Vielfachen entsprechen.[17] Die Druckmaxima und -minima überlagern sich hierbei punktgenau. Je nach Phasenlage entsteht entweder eine Verdopplung der Amplitude (*2A*) oder eine Totalauslöschung (*0A*). Voraussetzung ist die senkrechte Reklexion auf die gegenüberliegenden Fläche. Dieser Effekt tritt lt. DICKREITER (1997) hauptsächlich bei Räumen mit einem Flächenabstand < 8m auf. Bei Impulsschall führt dies zu sog. Flatter-Echos. Der Impuls wird hierbei ständig zwischen den Flächen hin und her reflektiert.

1.2.1.2 Schall-Beugung

Unter Beugung versteht man eine Ablenkung der Welle an einem Hindernis. Ist der Durchmesser eines Hindernisses *d* kleiner als die Wellenlänge λ, so findet eine Beugung am Hindernis bzw. um das Hindernis herum statt. Im Einzelnen bedeutet dies, dass die Schallwelle sich weiterhin so ausbreitet, als wäre dieses Hindernis nicht existent. Dadurch können Schallwellen im geometrischen Schattenraum eines Objektes auftreten. Dies geschieht ebenfalls wenn der Durchmesser mit der Wellenlänge identisch ist. Man spricht auch davon, dass neue Wellen entstehen. Am Bsp. eines **Doppelspaltes** (Abb.1.3) wird das sehr schnell ersichtlich. Wenn wie hier mehrere Wellen entstehen,

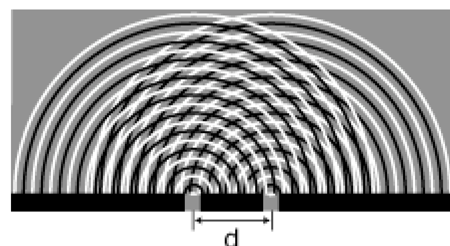


Abb. 1.3: `Doppelspalt [Quelle: S.60]`

[16] vgl. STAUDER (1973) S. 163
[17] vgl. DICKREITER (1997) S. 12

dann kann es zur Überlagerung derer kommen. Diese Überlagerung wird Interferenz genannt. (*siehe „Schall-Interferenz" S.11*)

Noch einmal zusammengefasst – eine Beugungserscheinung am Hindernis findet immer dann statt, wenn $d < \lambda$ oder $d = \lambda$.

1.2.1.3 Schall-Brechung

Allgemein kann man sagen, dass der Schall[18] seine Ausbreitungsrichtung an der Begrenzungsfläche zu einem Medium mit anderer Ausbreitungsgeschwindigkeit c ändert. Auch hier gilt das bekannte Brechungsgesetz[19]:

$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21}$

α = Einfallswinkel [°]
β = Ausfallswinkel [°]
c_1 = Schallgeschwindigkeit in Medium 1 $[\frac{m}{s}]$
c_2 = Schallgeschwindigkeit in Medium 2 $[\frac{m}{s}]$
n_{21} = relativer Brechungsindex

1.2.1.4 Schall-Interferenz

Interferenz oder auch Überlagerung bezeichnet ein Ereignis, bei dem zwei Schallwellen eine resultierende Welle bilden.

Bei minimal abweichender Frequenz und Amplitude entsteht eine sogenannte SCHWEBUNG. Diese ist eine durch „eine zeitlich period. Amplitudenschwankung gekennzeichnete Schwingungsform"[20] Wenn zwei harmonische Schwingungen $s_1(t)$ und $s_2(t)$ mit gleicher Amplitude A, aber verschiedenen Frequenzen f_1 und f_2 überlagert werden, so ergibt sich eine resultierende Frequenz $f_r = \frac{(f_1+f_2)}{2}$. (*Abb. 1.4 auf der nächsten Seite*) Die Amplitude schwankt hierbei periodisch um $\pm 2A$.

[18] im Modell als Schallstrahl betrachtet
[19] vgl. MEYERS-LEXIKON-4 (1981) S. 664 f
[20] MEYERS-LEXIKON-21 (1981) S. 373

Schwingung 1:

$s_1(t) = A \cdot \sin 2\pi f_1 t$ $\qquad A$ = Amplitude [m]

f_1 = Frequenz 1 [Hz]

t = Zeit [s]

Schwingung 2:

$s_2(t) = A \cdot \sin 2\pi f_2 t$ $\qquad A$ = Amplitude [m]

f_2 Frequenz 2 [Hz]

t Zeit [s]

resultierende Schwingung:

$s_r(t) = 2A \cdot \cos 2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t \cdot \sin 2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t$

Die auftretende Frequenz $f_s = f_1 - f_2$ wird SCHWEBUNGSFREQUENZ genannt.[21] Das bedeutet, dass wir - anders als gedacht - nicht zwei getrennte Frequenzen f_1 und f_2 gleichzeitig hören, sondern nur einen Ton - den Differenzton f_r (Schwebungston). Die Stärke dieses Tons schwankt mit der Schwebungsfrequenz f_s zwischen 0 und ihrem Maximalwert. Je kleiner die Differenz $|f_1 - f_2|$ ist, desto kleiner ist auch die Schwebungsfrequenz f_s. Bei einem sehr großen Unterschied z.B. $f_1 \lll f_2$ veschiebt sich f_s in den für uns nicht hörbaren Ultraschallbereich. In diesem Falle sind beide Töne f_1 und f_2 wieder getrennt von einander wahrnehmbar.

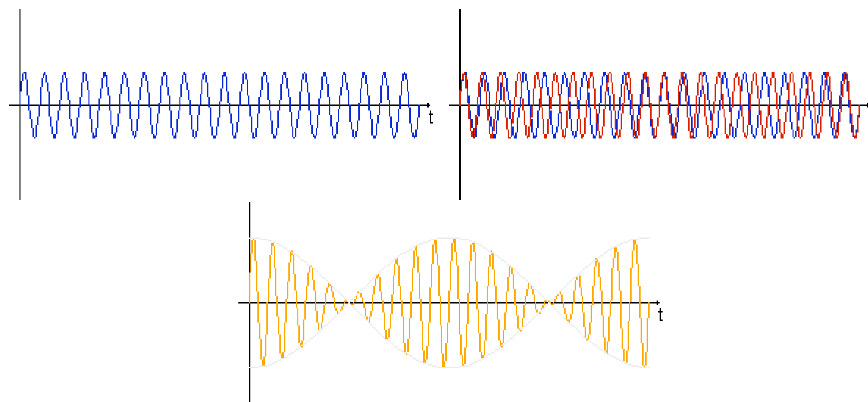


Abb. 1.4: `Entstehung einer Schwebung [Quelle: S.60]`

Haben die Frequenzen die gleiche Wellenlänge und die gleiche oder annähernd gleiche Frequenz so können sog. STEHENDE WELLEN entstehen. Voraussetzung dafür ist, dass eine Reflexion zwischen zwei parallelen Wänden stattfindet. Abhängig von der Laufzeit können Phasenunterschiede zwischen den beiden Wellen entstehen. Bei einer

[21] vgl. MEYERS-LEXIKON-21 (1981) S. 373

Verschiebung um eine halbe Wellenlänge (180°) löschen sich die Wellen annähernd aus. Bei einer Verschiebung um 0° bzw. 360° entsteht sogar eine Verdopplung der Amplitude, d.h. die Resultierende besitzt die doppelte Lautstärke. In Räumen mit stehenden Wellen (*vgl. 1.2.1.1*) ist demnach die Lautstärke nicht mehr homogen laut, sondern ungleichmäßig.[22]

1.2.2 Erläuterung Schallfeld

„Das die Schwingungen umgebende Medium nennt man Schallfeld" [23] Oder anders ausgedrückt, stellt ein Schallfeld das Gebiet dar, in welchem sich Schallwellen ausbreiten. Das kann praktisch jede Umgebung sein, solange in dieser kein Vakuum vorherrscht. Denn, ohne ein Medium ist keine Ausbreitung von Wellen möglich.

Ein Körper, der schwingt gibt an seine Umgebung, also das umgebende Medium akustische Schwingungen, sog. akustische Energie ab. Diese wird auch als SCHALLLEISTUNG, SCHALLSTÄRKE oder auch SCHALLINTENSITÄT bezeichnet.

Die kennzeichnenden Größen für ein Schallfeld (sog. SCHALLFELDGRÖSSEN) sind DICHTE ρ (kg/m^3), SCHALLDRUCK p (Pa oder N/m^2) und die GESCHWINDIGKEIT v (m/s),

Ein ideelles Schallfeld, d.h. bei ungestörtem Verlauf und homogenem Medium, breitet sich im Raum kugelförmig aus[24]. Näher beschrieben bedeutet dies, dass ausgehend von einem Punkt sich der Schall sowohl in x-, y- und z-Richtung ausbreitet.

Das Schallfeld wird in zwei Bereiche unterteilt. Das DIREKTSCHALLFELD und das DIFFUSSCHALLFELD. Das Direktschallfeld, auch Nahfeld oder Freifeld gennannt besteht aus den Wellen, welche direkt von der schallemittierenden Quelle stammen und sich ungehindert („frei") ausbreiten können. Die Ausbreitung des Diffusschallfeldes und die Anzahl der Minima und Maxima wird durch das Verhältnis des Durchmessers der abgestrahlten Fläche zur Wellenlänge der benutzten Schallfrequenz bestimmt.

Werden die Wellen mehrfach an Begrenzungsflächen reflektiert, gebeugt und zerstreut, dann entsteht ein sog. Diffusschallfeld (auch bekannt als Fernfeld). Theoretisch gesehen besteht ein Diffusschallfeld aus mehreren sich statistisch überlagernden Direktschallfeldern.[25] Durch unterschiedliche Phasenlagen der Schallwellen entstehen komplexe Interferenzen mit stark wechselnden Schalldruckmaxima und -minima. Es entstehen

[22]vgl. STAUDER (1973) S. 164
[23]STAUDER (1973) S. 31
[24]vgl. STAUDER (1973) S. 32
[25]vgl. DICKREITER (1997) S. 2

dadurch die bereits vorher beschriebenen Inhomogenitäten (*vgl. „Schall-Interferenz" S.13*) dieses Feldes.

1.2.3 Der Doppler-Effekt

Benannt wurde dieser Effekt nach seinem Entdecker Christian Doppler, österreichischer Physiker des 19. Jahrhunderts. Er befasste sich hauptsächlich mit Licht- und Schallwellen, sowie deren Eigenschaften. Sein Spezialgebiet war die Lichtaberration von Fixsternen. Um 1843 entdeckte er den Effekt, der bis heute nun seinen Namen trägt.

Der Doppler-Effekt berschreibt eine Änderung der wahrnehmbaren und auch der messbaren Frequenz wenn:

1. sich das schallemitierende Objekt (Sender) bewegt und das schallempfangende Objekt (Empfänger) ruht
2. das schallemitierende Objekt (Sender) ruht und das schallempfangende Objekt (Empfänger) sich in Bewegung befindet

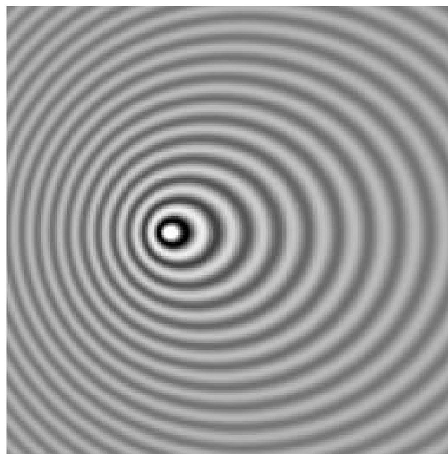


Abb. 1.5: `Doppler-Effekt [Quelle: S. 60]`

Es muss also eine relative Standortänderung von Sender und Empfänger zueinander existieren, bei der die Geschwindigkeit möglichst gleichförmig ist.

Normalerweise breiten sich Wellen gleichmäßig und kugelförmig aus. Bei Fall (1) oder auch (2) ist dies nicht mehr gegeben. Die Welle ist nicht mehr gleichförmig ausbreitend, sondern es ensteht eine Stauchung der Wellen in Ausbreitungsrichtung. (*Abb. 1.5)* Der Effekt ist sehr populär, da ihn nahezu jeder schon einmal erlebt hat. Das klassische Beispiel ist das vorbeifahrende Krankenfahrzeug mit eingeschalteter Sirene. In der Annäherungsphase ist der Signalton, also die Frequenz hoch (relativ gesehen). Nach

dem Passieren ändert sich plötzlich die Frequenz. Sie ist tiefer als kurz zuvor. Das liegt daran, dass die sich ausbreitetenden Wellen hinter dem Fahrzeug gestreckt sind. Sie haben eine größere Wellenlänge.

Die Relativbewegung von Sender und Empfänger zueinander induziert eine Stauchung und Streckung der Wellenfronten, welche als wahrgenommene Tonhöhenänderung hörbar und messbar sind.

1.2.4 Lautstärke

Lautstärke ist ein Wert, der technisch, objektiv messbar ist - im Gegensatz zur Lautheit (*siehe dazu „Lautheit", Kapitel 5 auf Seite 41*). Darstellbar ist die Stärke des Schalls (Schalldruckpegel) bzw. die daraus folgende Amplitudenstärke einer Welle.

Angegeben wird die Lautstärke in Dezibel (dB). Dies stellt einen Bezugswert zweier Größen zueinander dar und ist dimensionslos. In unserem Beispiel ist der Bezugswert der Schalldruckpegel. Dieser ist genormt und liegt bei $20\mu N/m^2$ bzw. bei 20Pa. [26]. Relativ- und Bezugswert stehen im logarithmischen Verhältnis zu einander und können wie folgt berechnet werden:

$$L = 20 \cdot log\frac{p_r}{p_0}$$

L = Vergleichswert $[dB]$
p_r = Relativwert
p_0 = Bezugswert

In unserem Beispiel ist der Bezugswert der Schalldruck. Aus diesem Grund wird die Einheit hierbei dB_{SPL} genannt. Die Indikation „SPL" bedeutet „Sound Pressure Level" – der englische Begriff für Schalldruck.

[26] vgl. DICKREITER (1997) S. 110

2 Kapitel 2

Anatomie des menschlichen Ohres

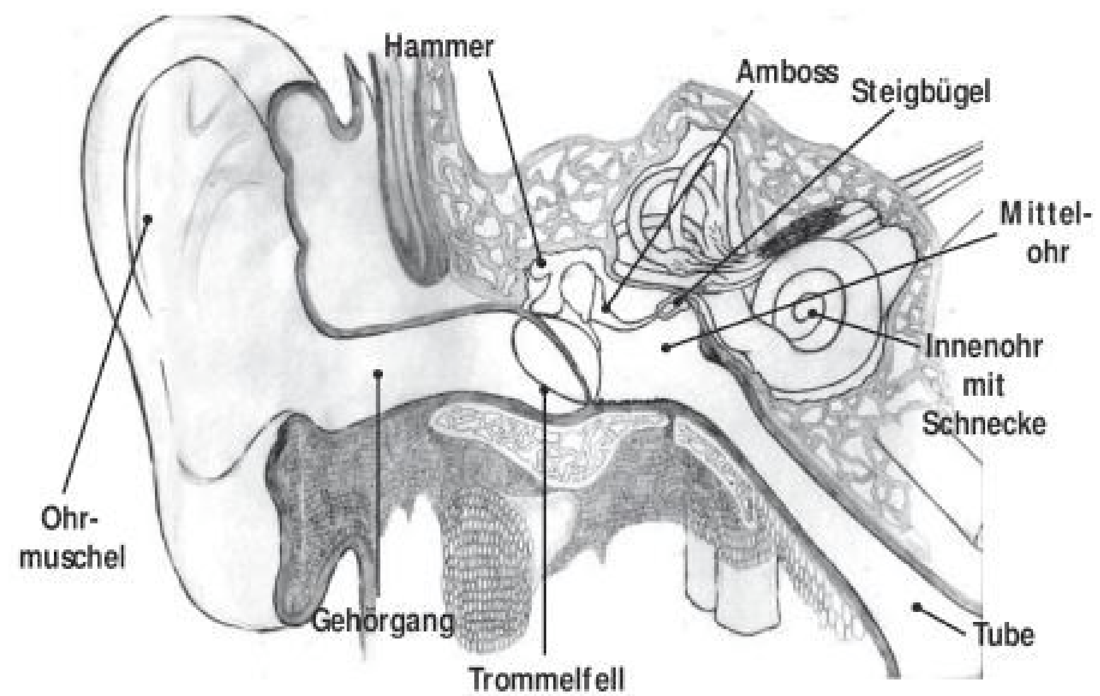


Abb. 2.1: Anatomie das Ohres [LUPBERGER (2007) S.16]

Das menschliche Ohr oder auch „Gehörwerkzeug"[1], wie es von CHLADNI (1802) seiner Zeit beschrieben wurde, lässt sich in zwei Bereiche gliedern. Den ersten Teil bildet das periphere Gehör, das in Äußeres Ohr, Mittelohr und Innenohr unterteilt werden

[1]CHLADNI (1802) S. 275

kann. Im zweiten Teil des Hörorgans findet die neuronale Verarbeitung statt, die zum Höreindruck im Gehirn führt

Das periphere Gehör läßt sich in drei Bereiche unterteilen: Außenohr (*2.1*), Mittelohr (*2.2*) und Innenohr (*2.3*). Diese drei Stufen lassen sich sowohl funktionell als auch anatomisch voneinander unterscheiden und werden nachfolgend genauer behandelt.

2.1 Das Außenohr

Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel und dem Gehörgang und schließt mit dem Trommelfell ab.

2.1.1 Ohrmuschel

Die Ohrmuschel (lat.: Concha) besteht nicht etwa aus Knochen oder Muskelgewebe – sie besteht vielmehr aus hautüberzogenem Knorpel. Sie erfüllt gleich mehrere Funktionen. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, den Schall der Umgebung einzufangen und wie ein Trichter über den Gehörgang zum Trommelfell zu führen. Bei diesem Prozess wird das Schallsignal bereits verzerrt. Diese Verzerrung bewirkt, dass Schallfeldmerkmale, abhängig von ihrer Richtung und Entfernung von räumlichen in zeitliche Informationen umgewandelt werden können. Dies ist eine wichtige Eigenschaft in Bezug auf den räumlichen Höreindruck. An der Ohrmuschel treten dabei durch die Windungen der Knorpelleisten akustische Effekte wie Reflexion, Beugung, Abschattung, Streuung, Resonanz oder auch Interferenz auf, die diese Verzerrungen hervorrufen. [2] Durch beispielsweise Abweichung des Frequenzspektrums und durch die Verzerrungen an der Ohrmuschel hervorgerufenen Laufzeitunterschiede kann in der Medianebene eine Lokalisation zwischen vorn und hinten stattfinden. Die Richtungswahrnehmung wird bei tiefen Frequenzen durch Beugung und bei hohen Frequenzen

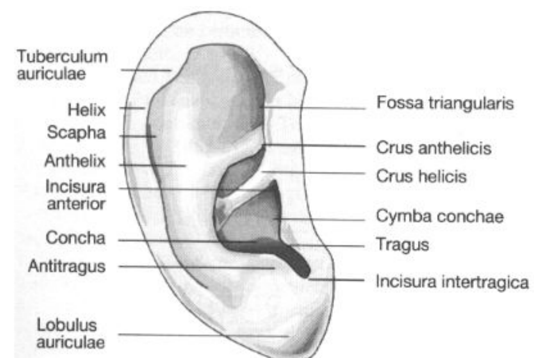


Abb. 2.2: `Ohrmuschel [Quelle: S.60]`

[2]vgl. STREPP (2006) S. 7

durch Abschattung realisiert. Schallereignisse die z.B. von hinten kommen werden durch die Form der Muschel zwischen 3000 – 6000 Hz gedämpft.[3] Jede Schallrichtung erhält somit eine individuelle Klangfärbung. Somit klingt ein Geräusch, das von oben kommt durch seine frequenzielle Verzerrung ganz anders, als ein Geräusch, das beispielsweise von der Seite auf unser Ohr trifft.

Vereinfacht ausgedrückt kann man sagen, dass die Ohrmuschel die Funktion eines frequenzabhängigen, akustischen Filters ausübt, der für die Richtungswahrnehmung essentiell wichtig ist.

tontechnische Analogie automatisierbarer, vollparametrischer x-Band EQ mit Delay $x \to \infty$

2.1.2 äußerer Gehörgang

Der Gehörgang ist ein ca. 2 – 3 cm langes, gebogenes, röhrenförmiges Gebilde. An der größten Stelle besitzt er einen Durchmesser von 1 cm. Durchschnittlich hat der Gehörgang aber einen Durchmesser von 7 – 8 mm. Seine Form beziehungsweise sein Querschnitt ist zum einen Teil rund, aber auch an einigen Stellen oval. Neben der Weiterleitung der Schallwellen verkürzt der Gehörgang auch den Abstand von Innenohr und Gehirn. Daraus resultieren relativ kurze Nervenbahnen für das Innenohr, die eine schnelle Informationsübertragung gewährleisten. Der Vorteil davon ist, dass die Informationsübertragung hoher Frequenzen, welche sonst sehr verlustbehaftet wäre, möglich ist. Der Gehörgang wirkt, da er mit dem Trommelfell abschließt, wie ein λ/4-Resonator, d.h. der Gehörgang wirkt wie eine gedackte Orgelpfeife[4]. Die Resonanzen liegen – wie bei gedackten oder auch gedeckten Pfeifen - bei λ/4, 3λ/4, 5λ/4 usw. und lassen sich folgendermaßen berechnen:

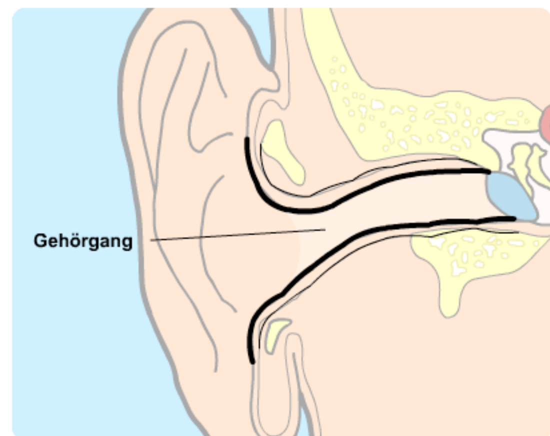


Abb. 2.3: Gehörgang [Quelle: S.61]

1. Resonanz

$\frac{\lambda}{4} \triangleq$ Länge des Gehörganges (in unserem Bsp. 3cm) bei der 1. Resonanzwellenlänge

$\frac{\lambda}{4} = 3\,cm = 0{,}03\,m \qquad \| \cdot 4$

[3] lt. STREPP (2006) S. 7
[4] vgl. TERHARDT (1998) S. 39

$\lambda = 4 \cdot 0,03\,m$

$\curvearrowright \lambda_{R1} = 0,12\,m$

mit Hilfe der Formel aus Punkt 1.2.1. lassen sich nun die Resonanzfrequenzen wie folgt berechnen:

$f = \frac{c}{\lambda_{R1}} = \frac{344\,m}{0{,}12\,m \cdot s}$

$\curvearrowright \mathbf{f_{R1}} = \underline{\mathbf{2.866,66\overline{6}\ Hz}}$

2. Resonanz

$\frac{3\lambda}{4} \triangleq$ Länge des Gehörganges (in unserem Bsp. 3cm) bei der 2. Resonanzwellenlänge

$\frac{3\lambda}{4} = 3\,cm = 0,03\,m \qquad \| \cdot 4$

$3\lambda = 4 \cdot 0,03\,m \qquad \| : 3$

$\lambda = \frac{4}{3} \cdot 0,03\,m$

$\curvearrowright \lambda_{R2} = 0,04\,m$

$f = \frac{c}{\lambda_{R2}} = \frac{344\,m}{0{,}04\,m \cdot s}$

$\curvearrowright \mathbf{f_{R2}} = \underline{\mathbf{8.600\ Hz}}$

3. Resonanz

$\frac{5\lambda}{4} \triangleq$ Länge des Gehörganges (in unserem Bsp. 3cm) bei der 3. Resonanzwellenlänge

$\frac{5\lambda}{4} = 3\,cm = 0,03\,m \qquad \| \cdot 4$

$5\lambda = 4 \cdot 0,03\,m \qquad \| : 5$

$\lambda = \frac{4}{5} \cdot 0,03\,m$

$\curvearrowright \lambda_{R3} = 0,024\,m$

$f = \frac{c}{\lambda_{R2}} = \frac{344\,m}{0{,}024\,m \cdot s}$

$\curvearrowright \mathbf{f_{R3}} = \underline{\mathbf{14.333,33\overline{3}\ Hz}}$

Es ist zu erkennen, dass sich f_{R3} bereits schon am oberen Ende der Hörschallgrenze befindet. Weitere Resonanzen lägen schon im ULTRASCHALLBEREICH und wären für uns nicht mehr hörbar. Dabei muß beachtet werden, daß bereits kleinste Unterschiede in der Länge des Gehörganges beachtliche Unterschiede bei den Resonanzfrequenzen bewirken.

Laut STREPP (2006) liegt die Eigenresonanzfrequenz des menschlichen Gehörganges „zwischen 2000 und 4000 Hz”[5]. Diese These konnte auch durch die Berechnung von f_{R1} bestätigt werden. Eine Resonanz in diesem Bereich hat zur Folge, dass genau diese Frequenzen um das Doppelte verstärkt werden. Welche Bedeutung dies hat, wird sich später bei den „Kurven gleicher Lautstärke” zeigen. Genau in diesem Bereich liegen die für die Sprachverständlichkeit wichtigen Frequenzen. Bei f_{R2} hingegen werden die für die Artikulation und Intonation wichtigen „S”-, „F”- und Zisch-Laute verstärkt.

Neben seiner Resonatorfunktion[6] dient der Gehörgang auch zum Schutz des Trommelfells vor Schmutz und Verletzungen.

tontechnische Analogie 3-Band EQ / Filter mit festen Frequenzen, festen Q-Faktor und festen +6 dB boost.

Anmerkung: *der Gehörgang ist beim Menschen genau so ein individuelles Körpermerkmal, wie zum Beispiel der Fingerabdruck oder die Form der Iris. Auch sind die Resonanzfrequenzen bei jedem Menschen individuell. Große Unterschiede bei den sprachverständlichen Frequenzen sind demnach möglich. Bei Anschaffung von Hörgeräten, In-Ear Monitoring oder auch Gehörschutz ist es daher ratsam eine sog.* OTOPLASTIK *anfertigen zu lassen, da es kein „Standard-Ohr” beim Menschen gibt.*

2.2 Das Mittelohr

2.2.1 Trommelfell

Das Trommelfell ist eine über einen knöchernen Rahmen gespannte, nahezu kreisrunde, beziehungsweise ovale, häutige Membran. [7] Der Durchmesser liegt bei ca. 10-11mm und die Dicke kann mit ca. 0,1mm angegeben werden, die Effektivfläche für das

[5] STREPP (2006) S. 7
[6] vgl. KEIDEL (1975) S. 48
[7] vgl. DICKREITER (1997) S. 107

Gehörknöchelchen mit rund $0,55cm^2$. Die Membran liegt mit einer Neigung von ca. 40°-50° schräg im Gehörgang. Dadurch werden hauptsächlich stehende Wellen (*vgl. „Stehende Wellen" auf Seite 10*) im Gehörgang vermieden.

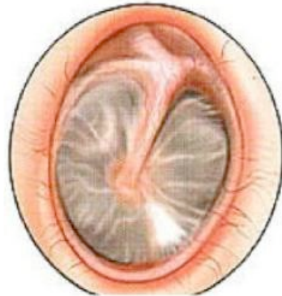


Abb. 2.4: `Trommelfell [STREPP (2006) S. 8]`

Durch den Luftschall wird die Membran zum Mitschwingen angeregt und überträgt die mechanische Schwingung über die GEHÖRKNÖCHELCHEN auf das OVALE FENSTER. Die Spannung des Trommelfells kann mittels Muskelspannung verändert werden. Dies dient hauptsächlich zum Schutz vor hohen Schalldruckpegeln ($> 90dB_{SPL}$). Dabei wird das Trommelfell mittels mehrer Mittelohrmuskeln, den sog. TROMMELFELLSPANNERN gespannt. Es entsteht hierbei eine „Versteifung" des Trommelfells. Dadurch werden mehr Anteile des Luftschalls zurückreflektiert und nicht auf die Gehörknöchelchen, das restliche Mittelohr und das empfindliche Innenohr übertragen. Bei lauten impulshaften Schallereignissen versagt jedoch dieser Mechanismus und eine Schädigung des Gehörs ist nicht ausgeschlossen.

Das Trommelfell kann in zwei Bereiche aufgegliedert werden – einen gespannten und einen ungespannten oder lockeren Bereich. Für die Schallaufnahme ist eigentlich nur der gespannte Teil relevant. Er besitz die Effekitvfläche von $0,55cm^2$, welche bereits oben erwähnt wurde. Dieser Teil des Trommelfells nimmt die Druckunterschiede der Luft auf und leitet sie an den dahinterliegenden Hammer (Gehörknöchelchen) als mechanische Schwingung weiter.

tontechnische Analogie Mikrofonmembran

2.2.2 Paukenhöhle und Eustachische Röhre

Direkt hinter dem Trommelfell befindet sich die Paukenhöhle, welche die Gehörknöchelchen beinhaltet. Sie fasst ca. $1cm^3$ an Volumen, mit einer Länge von 14mm und einer Breite von 2,5mm – 7mm. Ausgekleidet ist sie mit einer atmungsaktiven Schleimhaut, welche einen Gasaustausch gewährleistet und dennoch „als immonologische Schranke"[8] wirkt.

Die Paukenhöhle ist mit Luft gefüllt. Das bedeutet, dass sich sowohl hinter, als auch vor dem Trommelfeld Luft befindet. Im Umkehrschluss heißt das aber nicht, dass die

[8] vgl. STREPP (2006) S. 9

gleichen Druckverhältnisse existieren. Der Druck vor dem Trommelfell wird in der Regel durch den vorherrschenden Außendruck oder auch Luftdruck definiert. Die Paukenhöhle ist aber ein geschlossenes System. Es kann daher zu Druckunterschieden zwischen Außen- und Innendruck kommen. Um den Innendruck zu kompensieren ist die Paukenhöhle durch die EUSTACHISCHE RÖHRE, auch als Ohrtrompete bezeichnet mit dem Mund- und Rachenraum verbunden. Ein Beispiel aus dem Alltag zeigt, dass der Druckausgleich sehr wichtig ist. Wenn man z.B. mit einem Fahrstuhl in das oberste Stockwerk eines Hochhauses fährt, dann verspürt man durch die Höhen- und Druckänderung einen unangenehmen Druck im Ohr, wodurch das Hören an sich stark erschwert wird. Dies kann durch mehrmaliges Schlucken behoben werden, wodurch ein Druckausgleich über die Eustachische Röhre geschieht.

Bei grippalen Infekten oder einer Erkältung kann die Eustachische Röhre in Ihrer Funktion durch starke Sekretbildung im Hals-Nasen-Ohrenbereich beeinträchtigt werden. Die Druckkompensation wird erschwert oder gar ineffektiv, da der Zugang zur Paukenhöhle verschlossen werden kann. Im schlimmsten Fall führt der Totalverschluss zu einer Mittelohrentzündung oder Mittelohrvereiterung, welche das Gehör nachhaltig schädigen kann.

2.2.3 Gehörknöchelchen

Die Gehörknöchelchen erhalten ihren Namen durch ihre charakteristische Form. Sie üben einen Hebelmechanismus aus, welcher die Schwingungen vom Trommelfell zum ovalen Fenster der Gehörschnecke überträgt. Direkt am Trommelfell sitzt der Hammer – am ovalen Fenster ist es der Steigbügel. Und dazwischen befindet sich der Amboss. Praktisch gesehen bilden sie eine Übertragungskette vom Trommelfell zum Innenohr.

Die Knochen sind die kleinsten, die wir Menschen in unserem Körper haben. Genauso wie die Paukenhöhle sind auch die Knochen von einer atmungsaktiven Schleimhaut überzogen.

Die Gehörknöchelchen konzentrieren die am Trommelfell ankommende Energie und verstärken diese um das 30fache[9]. Allerdings gibt es auch hier einen Schutzmechanismus, welcher das Innenohr vor zu großen und gefährlichen Schalldrücken bewahrt. Zwei kleine Muskeln halten auch hier den Apparat unter Spannung. Ein Muskel zieht in Richtung Trommelfell, der andere in Richtung Innenohr. Dabei stehen sie unter einer kleinen, aber ständigen Anspannung, um den Knochenapparat in seiner Form zu halten.

[9] lt. MAYER (2005) S.65

Wird der Schalldruck zu stark, ziehen sich diese beiden Muskeln reflexartig zusammen. Die Knochen ändern dadurch ihre Hebelverhältnisse und mindern die ankommende Energie um bis zu zwei Drittel.[10] Dieser Effekt hat eine Latenz von ca. 10ms. Er kann unter Umständen aber auch erst nach einer halben Minute eintreten. Das bedeutet, dass alle impulshaften Geräusche potentiell gehörgefährdend sind, da das Gehör nicht schnell genug darauf reagieren kann. Es wird dann die volle Energie auf das Innenohr übertragen. Diese wird sogar noch durch die Gehörknöchelchen verstärkt.

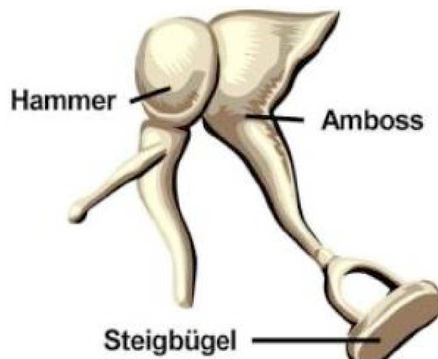


Abb. 2.5: Gehörknöchelchen [STREPP (2006) S. 10]

Ein klassisches Beispiel ist das Knalltrauma. Ein sehr lauter Impuls mit hoher Energie, zum Beispiel ein Pistolenschuss wird komplett zum Innenohr übertragen. Im Innenohr knicken die empfindliche Härchen um, es bilden sich kleine Thromben an den Haarwurzeln und es entsteht ein Tinitus. Mit durchblutungfördernden Maßnahmen ist dies allerdings innerhalb der ersten 48 Stunden behebbar. Nach dieser Zeit ist ein irreversibler Gehörschaden nicht auszuschließen. Schlimmstenfalls entsteht beim Knalltrauma ein Knochenbruch an einem der Gehörknöchelchen, welcher einen totalen Hörverlust zur Folge hat, da nichts mehr zum Innenohr übertragen wird.

Ist das Gehör längere Zeit hohen Schalldrücken ausgeliefert, können die Muskeln der Knochen ermüden und ihre Funktion nicht mehr entsprechend ausüben. Auch hier besteht wieder eine akute Gefahr für das Gehör, welche oft unterschätzt wird.

Hammer

Der Hammer (lat.: Malleus) ist direkt mit dem Trommelfell verbunden und ist das erste Glied in der Übertragungskette der Gehörknöchelchen. Er besitz eine Länge von etwa 8mm und wiegt etwa 25mg. Der Knochen ist freischwingend an zwei Bändern aufgehängt, um etwaigen Reibungsverlust zu minimieren. Dadurch ist eine nahezu verlustlose Schwingungsübertragung an den Amboss möglich.

Amboss

Der Amboss (lat.: Incus) hat einen gelenkförmigen Kontakt mit dem Hammer, von welchem er die Schwingungen empfängt. Er ist das Mittelglied und sitzt zwischen Hammer

[10] lt. VOLKER BERNIUS (2006) S.176

und Steigbügel. Der Knochen ist ebenfalls wie der Hammer an zwei der vier flexiblen Bändern aufgehängt. Ankommende Schwingungen werden über den Ambossschenkel an der Steigbügel weitergeleitet.

Steigbügel

Auch beim Steigbügel (lat.: Stapes) ist die Verbindung zu seinem „Vorglied" ein Gelenk. Als letztes Glied gibt er die Schwingungen an das ovale Fenster vom Innenohr ab. Die typische Form des Knochens war verantwortlich für seine Namensgebung. Er wiegt ca. 3,5mg und ist etwa 3,5mm lang. Die Fläche, welche auf das ovale Fenster der Gehörschnecke trifft wird Steigbügelplatte genannt. Sie ist an der Seite zur Schnecke mit Ringfasern umschlossen, welche wiederum mit dem ovalen Fenster verwachsen sind und dadurch eine feste Verbindung eingehen.

Funktion

Die Schallwellen müssen in ihrer Impedanz von Luft auf die Flüssigkeit der Gehörschnecke angepasst werden. Da die Schallwellen in Luft nur eine relativ geringe Druckenergie haben, müssen diese entsprechend verstärkt werden. (*siehe S. 22*) Dies geschieht auf zweierlei Wegen.

1. Die erste Verstärkung ensteht durch die Flächenunterschiede zwischen Trommelfell und ovalem Fenster. Der Unterschied beträgt dabei 1:17[11]. Wobei das Trommelfell erheblich größer als das ovale Fenster ist. Es ist ein klassischer Effekt der Mechanik, welcher u.a. in der Hydraulik Verwendung findet.
2. In zweiter Linie sorgt die Hebelwirkung der Knochen für eine Verstärkung um den Faktor 1,3.

Insgesamt ergibt das eine Verstärkungsleistung von 22,1[12]. Das entspricht in etwa 27db. Dadurch können 60% der Energie an das Innenohr übertragen werden. Ohne diesen Verstärkungsapparat würde der Verlust durch Übertragungswege und Impedanzanpassungen 99% betragen.

tontechnische Analogie PreAmp mit Limiter

[11] lt. STREPP (2006) S.12
[12] lt. STREPP (2006)

2.3 Das Innenohr

„Das Innenohr stellt einen flüssigkeitsgefüllten Resonator dar, bei dem an unterschiedlichen Orten in Abhängigkeit von der Frequenz große Schwingungsamplituden auftreten.” [13]

„Gleichzeitig wird der niedrige Schallwellenwiderstand (Schallimpedanz) der Luft an die hohe Impedanz des flüssigkeitsgefüllten Innenohrs angepasst” [14]

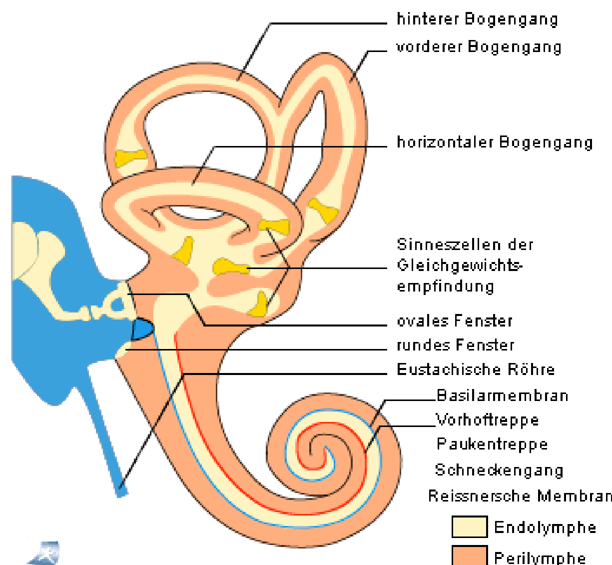


Abb. 2.6: `Innenohr [Quelle: S.60]`

Das Innenohr ist das letzte Glied der mechanischen Schalleindrucksverarbeitungskette. In ihm werden die mechanischen Schwingungen in neuronale Impulse umgewandelt, welche dann über den Hörnerv zum Gehirn gelangen und dort verarbeitet werden. In seiner Gesamtheit besteht es aus der GEHÖRSCHNECKE (lat.: Cochlea), welche für die eigentliche Schallverarbeitung zuständig ist, den 3 BOGENGÄNGEN und dem VORHOF (lat.: Verstibulum). Die beiden letzten sind primär eher für die Gleichgewichtsorientierung, als für die auditive Verarbeitung zuständig. Das Gesamtvolumen beträgt lt. FRANZEN (2001) $140mm^3$. Umgeben ist das Innenohr von einer knöchernen Kapsel, deren Material eines der härtesten des menschlichen Körpers ist. Das Innenohr hat die Form eines Schneckenhauses und hängt über Bindegewebe nur lose eingebettet im sog. Felsenbein, einer knöchernen Kapsel des Schädels. Umhüllt ist das Innenohr von einer Fettschicht, die als Isolierung zum Schädel hin wirkt.[15] Dadurch sollen durch

[13] SCHLEGEL (1999) S. 144
[14] THEWS (2005) S. 338
[15] vgl. HOPPE (1982) S.712

Körperschall bedingte Schallweiterleitungen, die über den Schädel erfolgen und sich mittelbar auf das Innenohr einwirken können, reduziert werden.

2.3.1 Gehörschnecke (lat.: Cochlea)

Das eigentliche Sinnesorgan ist die Gehörschnecke (lat.: Cochlea). Der Innenraum der Schnecke kann (abhängig ob Mann oder Frau) zwischen 32mm und 37mm lang sein.[16]

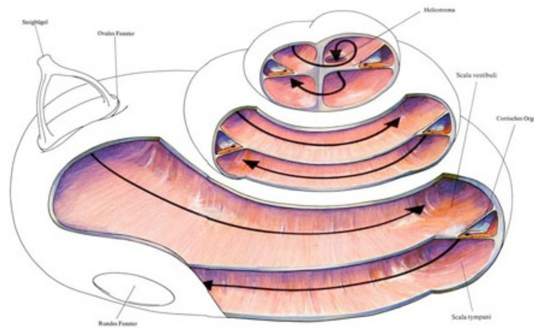


Abb. 2.7: Gehörschnecke [Quelle: S.61]

Insgesamt hat die Schnecke zweieinhalb Windungen. Am Anfang hat sie einen Druchmesser von ca. 7mm. Er nimmt zur Spitze hin ab und beträgt am Ende nur noch etwa 4mm.[17] In Längsrichtung ist die Schnecke durch die REISSNERISCHE MEMBRAN und BASILARMEMBRAN in drei Hohlräume unterteilt. (*siehe Abb. 2.7*) Die Reissnermembran bildet die Begrenzung zwischen Endolymphe und Perilymphe. Dabei dient sie zur „Trennung elektrischer Potentiale"[18]. Als innere Begrenzung befindet sich im Labyrinth die Basilarmembran, auf der die Sinneshärchen sitzen. An der Spitze der Schnecke befinden sich Pauken- und Vorhoftreppe. Sie sind über eine kleine Öffnung miteinander verbunden.

Den Anfang der Schnecke bildet das OVALE FENSTER und am Ende sitzt das RUNDE FENSTER. Dieses ist für den Druckausgleich im Labyrinth zuständig. Da Flüssgkeiten, anders als Gase bekanntermaßen nicht komprimierbar sind, muss sich die Lymphflüssigkeit bei Bewegung des ovalen Fensters irgendwohin ausbreiten können. Das runde Fenster ist der Gegenspieler des ovalen Fensters und bietet eine Kompensation des Drucks im Labyrinth. Bewegt sich das ovale Fenster nach innen, dann bewegt sich das runde Fenster nach außen und umgekehrt.

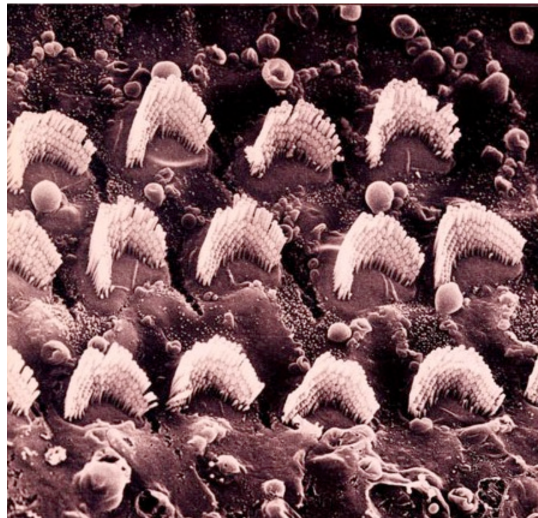
Der Raum zwischen knöcherener Hülle und dem Labyrinth wird PERILYMPHRAUM genannt und ist mit einer Flüssigkeit (PERILYMPHE) gefüllt. Diese ist ein Serumfiltrat, d.h. es ist kaliumarm und sehr natriumreich. Es dient zu Ernährung der Sinneszellen. Die Flüssigkeit, welche die Sinneshärchen in Bewegung versetzt, ist die ENDOLYMPHFLÜSSIGKEIT. (*siehe Abb. 2.6 auf der vorherigen Seite*) Sie ist, im Gegensatz zu Perilymphe kaliumreich und natriumarm. Die Endolymphflüssigkeit wird die durch die Schwingungen des Steigbügels am ovalen Fenster in Bewegung gesetzt und stimuliert so

[16] siehe SCHLEGEL (1999) S.321
[17] vgl. STREPP (2006) S. 14
[18] vgl. TERHARDT (1998) S. 57

die Härchen der Basilarmebran.

Basilarmembran und Sinneshärchen

Die Basilarmembran enthält ca. 17.000 [19] Sinneszellen. Hierbei handelt es ich um kleine Härchen (sog. ZILIEN[20]), welche die eigentlichen Rezeptoren für die Schallschwingung darstellen.



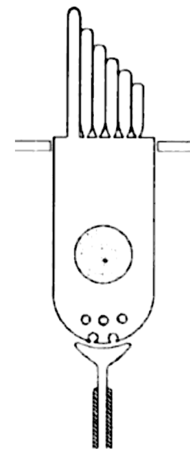


Abb. 2.8: `links: Haarzellen [Quelle: S.61]`
`rechts: Haarzellenanordnung [SCHLEGEL (1999) S.325]`

Angeordnet sind sie in drei Reihen (*siehe Abb.2.8*, links). Sie sind zwischen sog. DEITERS-STÜTZZELLEN eingebettet. Zusammen bilden sie das CORTISCHE ORGAN. Es wird dabei zwischen den inneren Haarzellen, welche drei bis fünf Reihen einzelner Härchen bilden können (*siehe Abb.2.8, rechts*) und den äußere Haarzellen unterschieden. Es gibt auch einen Unterschied des Aufbaus zwischen äußeren und inneren Haarzellen. Die äußeren sind schmaler und säulenförmiger. Die inneren sind bauchiger, dicht von Stützzellen umgeben und näher an der Schneckenachse aufgereiht.

2.3.2 Vestibularapparat (Gleichgewichtsorgan)

Das Gleichgewichtsorgan (auch Vestibularapparat) sitzt neben der Cochlea (Schnecke), bestehend aus den DREI BOGENGÄNGEN, welche wie auch die Schnecke mit Lymphflüssigkeit gefüllt sind. Die beiden Systeme, sowohl Cochlea und Vestibularapparat

[19] lt. FRANZEN (2001)
[20] vgl. SCHLEGEL (1999) S.324

sind über die die Endolymphe mit einander verbunden. Die Bogengänge liegen dreidimensional angeordnet im Ohr. Für jede Achse des Raumes gibt es einen Bogengang. Sie dienen zur Richtungs- und Lageempfindung. In den Gängen befinden sich Zellen für die Gleichgewichtsempfindung, die sog. Makulaorgane. (*siehe Abb.* **??** *auf Seite ?? und „Sinneszellen der Gleichgewichtsempfindung" Abb. 2.6 auf Seite 25*) Bei aufrechter Kopfhaltung ist der horizontale Bogengang 30° nach hinten geneigt. Die anderen zwei haben eine relativ senkrecht Anordnung in Bezug auf den horizontalen Gang.

Wie auch bei der Basilarmembran dienen bei dem Makula-Organ Haarsinneszellen als Rezeptoren. Diese sind jedoch von einer gallertartigen Masse umgeben - der CUPULA. Durch eine Lageänderung des Kopfes wirken Trägheitsmomente der Endolymphe auf die Cupula ein und verformen diese. Über die eingelagerten Sinneshärchen werden die Informationen an das Gehirn weitergeleitet. Dort werden die Informationen erst in eine Richtungswahrnehmung interpretiert.

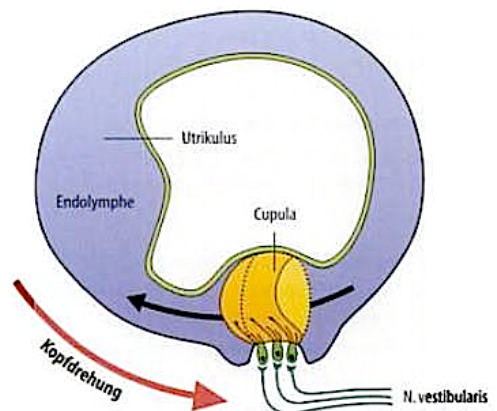


Abb. 2.10: Bogengang [SCHLEGEL (1999) S. 145]

2.4 Der Hörnerv und das Nervensystem

„Der Hörnerv besteht aus etwa 30.000 Nervenfasern.”[21]

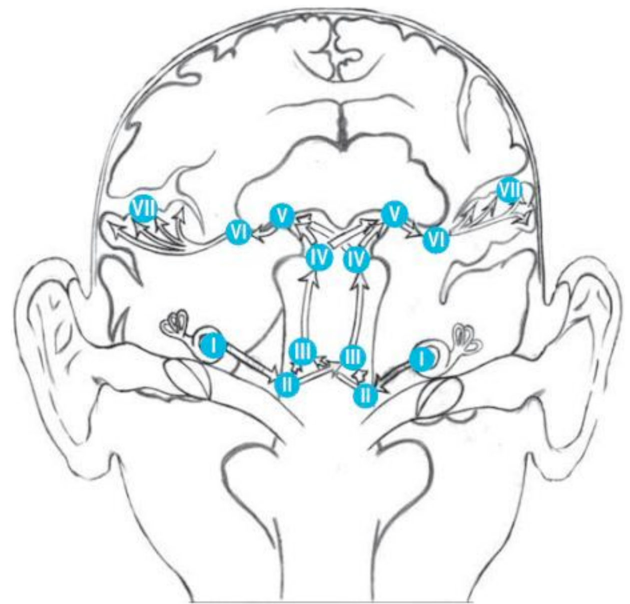


Abb. 2.11: Hörvorgang [LUPBERGER (2007) S. 19]

Die Informationen werden überwiegend nur in eine Richtung geleitet – vom Ohr hin zum Gehirn. Man spricht daher von AFFERENTEN NERVEN - das Gegenteil sind die EFFERENTEN NERVEN. Fast alle Nervenfasern nehmen aber ihren Anfang in den inneren Härchen (*siehe 2.3.1 auf Seite 27*) auf der Basilarmembran. „Jedes Sinneshärchen hat mit bis zu 20 Nervenfasern synaptische Verbindungen”[22]. Die Fasern verlaufen von den Sinneszellen der Cochlea radial zur Schneckenachse und vereinigen sich am Ende zu einem einzigen Strang **(I)**. Gemeinsam mit den Nerven des Vestibularapparates treten die Nervenfasern am VERLÄNGERTEN RÜCKEMARK **(II)** in das ZNS (Zentrale Nevensystem) ein. Über die UNTERE **(III)** und MITTLERE BRÜCKE **(VI)** gelangen die Impulse ins MITTELHIRN **(V)**. Von da werden die Nervenimpulse über das ZWISCHENHIRN **(VI)** bis in den AUDITORER CORTEX **(VII)** des Temporallappen geleitet.

Abb.2.11: *I Cochlea; II verlängertes Rückemark; III Obere Olive; IV seitlicher Schleifenbahnkern; V unterer Vierhügelkern; VI mittelere Kniehöcker; VII Hörrinde*

Ähnlich wie bei der Motorik oder dem Sehen ist auch beim Hörvorgang die jeweils gegenüberliegende Hirnhemisphäre für ein Ohr zuständig. Beispielsweise wird der Schalleindruck des rechten Ohres im linken auditorischen Cortex verarbeitet und umgekehrt.

[21] vgl. SCHLEGEL (1999) S. 327
[22] vgl. TERHARDT (1998) S. 58

Teil II

Hörmechnismus, Wahrnehmung

Kapitel 3

3 Der Hörmechanismus

(physikalische, biologische und neurologische Systeme)

Hier soll nun näher darauf eingegangen werden, wie der Schall, konkret der Luftschall verarbeitet wird. Welche Ereignisse treten ein und welche Eigenschaften sich davon ableiten lassen wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

Am Anfang steht die mechanische Schallverarbeitung und die Schallaufnahme. Es folgt neuronale Umsetzung über die Hörbahn und schließlich die kognitive Verarbeitung im Gehirn.

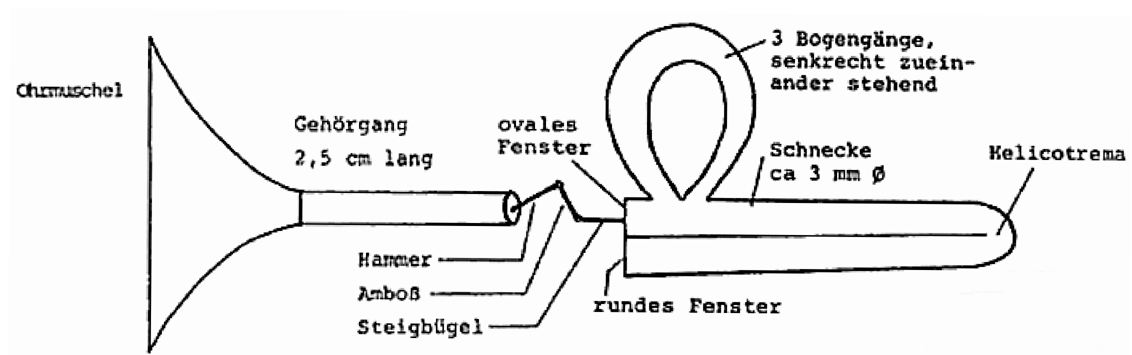


Abb. 3.1: `Ohr, mechanisches Modell [BRINKER (2001) S. 1264]`

Ohrmuschel und Gehörgang Der Schall erfährt bei der Passage des Außenohrs eine Resonanz mit einer Verstärkung von 20dB[1] bei etwa 2,5kHz. Die Frequenzen von f_{R1} bis f_{R3} (*siehe auch 2.1.2 auf Seite 18 f.*) liegen direkt im Hörraum der menschlichen Sprache. Dieser Frequenzbereich wird verstärkt – das trägt vor allem zur besseren Sprachverständlichkeit bei.

[1] lt. FRANZEN (2001)

Mittelohr Hier wird der Schall nochmals verstärkt, um ihn an den Widerstand der Lymphflüssigkeit anzupassen. (*siehe dazu 2.2.3 auf Seite 24*) Nebenbei haben diese Mechanismen noch eingebaute Schutzfunktionen, die das Innenohr vor Schaden bewahren sollen. Sie tragen zur Geräuschunterdrückung bei und bieten einen mechanischen Schutz vor äußeren Keimeinwirkungen durch eine hermetische Abriegelung des Trommelfells.

Innenohr Der Schall wird hier in elektrische Signale umgewandelt, ähnlich eines elektroakustischen Wandlers. Die Erkennung von unterschiedlichen Frequenzen, sowie deren Intensität findet hier statt.

3.1 physischer Hörvorgang

(Funktionsweise des Innenohrs)

Das eigentliche Sinnesorgan für die Wahrnehmung ist die Cochlea – genauer genommen ist es das Cortische Organ mit seinen Rezeptoren. Alle anderen „Stationen”, die der Schall bis dahin nehmen musste dienen nur der Aufbereitung und Schallzuführung. Man spricht auch vom peripheren Hören.

Im Innenohr entsteht durch ein Schallsignal eine Wanderwelle entlang des Cortischen Organs. Wenn man dieses Organ ausrollt (hypothetisch gesehen) nimmt es eine schlauchförmige Form an. Mechanische Reize lassen das Cortische Organ auf- und abschwingen. Ein Amplitudenmaximum entsteht abhängig der Schallfrequenz an unterschiedlichen Orten auf der Basilarmembran. Man spricht von TONOTOPER ORGANISATION. „Tonotopie ist die Grundlage der unterschiedlichen Wahrnehmung von Tonhöhen”[2] Sie beruht auf dem Prinzip der DISPERSION. Das bedeutet, dass sich unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich weit und unterschiedlich schnell ausbreiten. Hohe Frequenzen verlieren je nach Medium durch dessen Widerstand schnell ihre kinetische Energie – sie unterliegen also eher einer Dämpfung, als tiefe Frequenzen. Bei der Basilarmembran werden deswegen die hohen Frequenzen am Anfang (sog. SCHNECKENBASIS), also beim ovalen Fenster

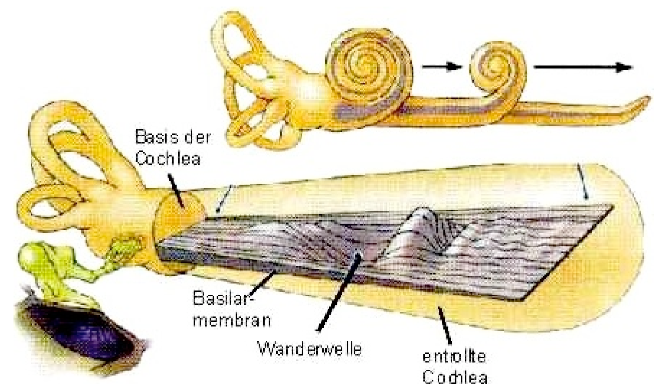


Abb. 3.2: `Basilarmembran [Quelle: S.61]`

[2]siehe LUPBERGER (2007) S. 17

detektiert und die tiefen Frequenzen, aufgrund ihrer weiterreichenden Ausbreitung an der Spitze.

Die Bewegung der Endolymphe löst eine Biegung und Stauchung der Sinneshärchen aus, wodurch eine Botenstoffausschüttung induziert wird. Der Prozess, bei dem mechanische Schwingungen in chemische und elektrische Signale umgewandelt werden, wird TRANSDUZIEREN genannt.[3] Die inneren Haarzellen geben einen Transmitter an die Nervenfasern ab. Die äußeren dagegen sind für die Verstärkung des Amplitudenmaximums der Wanderwellen und der Stimulation der inneren Haarzellen zuständig.

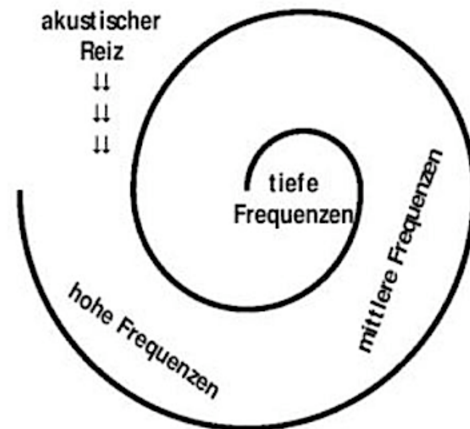


Abb. 3.3: Tonotopie [LUPBERGER (2007) S.17]

3.2 neuronaler & kognitiver Hörvorgang

Sobald die Nervenimpulse das Hörorgan (Cochlea) verlassen spricht man von RETROCOCHLEÄREN oder ZENTRALEM HÖREN. Die afferenten Nervenfasern, die dem Gehirn zulaufenden Fasern enden im hinteren und vorderen COCHLEARISKERN des Hirnstammes. Von dort verlaufen die Informationen sowohl gekreuzt, als auch ungekreutz zu den oberen Oliven (*siehe Abb. 2.11 auf Seite 29*). Bis zu diesem Punkt verliefen die Informationen beider Ohren noch völlig getrennt von einander. Aber genau an den oberen Oliven treffen sie das erste Mal aufeinander. Von hier aus verlaufen die Impulse zur HÖRRINDE. Dabei passieren sie die seitlichen Schleifenkerne und den mittleren Kniehöcker. In der Hörrinde (auch AUDITORISCHER CORTEX) findet dann die zentrale Verarbeitung statt. Das Gehirn interpretiert die ihm zugeleiteten Reize. Es entsteht eine Wahrnehmung – die auditive Wahrnehmung.

Die eigentliche Wahrnehmung findet in KORTIKALEN ZENTREN des Gehirns statt. Das sind in der Regel die SCHLÄFEN- und SCHEITELLAPPEN. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verarbeitung immer komplexer wird, je zentraler sie im Gehirn stattfindet. Aus diesem Grund kann an dieser Stelle auch nur schematisch auf das Thema eingegangen werden. In Kapitel 2.4 (*auf Seite 29*) wurde bereits erwähnt, dass die Schallreize auf ihrem Weg zum Gehirn mehrere Stationen durchlaufen. Dort finden jeweils eigenständige Prozesse statt, bei denen Informationen ausgewertet und

[3] vgl. THEWS (2005) S. 341

verarbeitet werden. Genauer soll dabei in „Die Wahrnehmung" im Kapitel 4 auf der nächsten Seite eingegangen werden.

Kapitel 4

4 Die Wahrnehmung

Wir Menschen nehmen unsere Umgebung über vielerlei Sinne wahr. Diese Wahrnehmungen werden dabei in zwei Bereiche unterteilt – die Nahsinne und die Fernsinne. Bei Nahsinnen geht eine unmittelbare Interaktion mit dem Körper und den Rezeptoren voraus. Bei Fernsinnen ist dies im Gegensatz nur mittelbar. Sehen, Hören oder Riechen sind die drei Fernsinne. Sie können über Distanzen hinweg eingesetzt werden und bedienen sich in der Regel eines Trägermediums. Es wird von entfernter Lokalisation der Sinne gesprochen.

Wahrnehmnug definiert sich durch eine Reizaufnahme, deren Weiterleitung, Speicherung und ein Vergleich mit bereits Gespeichertem. Es folgt eine Reizverarbeitung und eine angemessene Reaktion.

Im Folgenden ist für uns primär der Hörsinn, also die auditive Wahrnehmung als einer der Fernsinne relevant.

Anmerkung: *Der auditive Sinn ist im Übrigen der einzige Sinn, der permanent aktiv ist. Augen können geschlossen werden - Ohren dagegen nicht. Das Gehör ist einer Dauerbelastung ausgesetzt. Es kann sich nicht völlig den einwirkenden Reizen entziehen. Eine „Abschaltung" kann nur auf neuronaler Ebene erfolgen. Die mechanischen Systeme des Ohres bleiben dennoch weiterhin aktiv.*

Grundbegriffe der Wahrnehmung[1]

1. Die **Sinnesmodalität** beschreibt eine Gruppe von ähnlichen Sinneseindrücken, welche über ein Sinnesorgan aufgenommen werden, aber gemeinsam im Zentralen Nervensystem verarbeitet werden können.
2. Innerhalb einer Sinnesmodalität kann eine Unterscheidung zwischen **Qualität und Quantität** getroffen werden. Qualität definiert unterschiedliche Aspekte, wie beispielsweise der Frequenzgang oder Kategorisierung wie „süß-sauer" beim Geschmack. Quantität beschreibt die Stärke eines Reizes, zum Beispiel Lautstärke eines Tones oder Helligkeit einer Farbe.
3. Die **Rezeptoren** eines Sinnesorgans reagieren auf Umweltreize, haben sich auf ihre Aufgabe spezialisiert und sind auch nur für diese speziellen Umwelteinflüsse empfänglich.
4. Die **afferenten und efferenten Nervenbahnen** sind die „Datenleitungen" von den Rezeptoren zum Gehirn. Afferente Bahnen leiten Signal zum Gehirn hin und wieder zurück. (*vgl. dazu Kapitel 2.4 auf Seite 29*) Auf ihrem Weg findet die Verarbeitung statt. Sie haben damit großen Einfluss auf die Wahrnehmung. Die efferenten Bahnen (vom Gehirn kommend) leiten Informationen (emotional-, motivation-bedingt, etc) an die Rezeptorzellen und Sinnesmodalitäten weiter. Sie bilden sozusagen ein „Feedback" vom Gehirn und haben Einfluss darauf, welche Information mit welcher Intensität aufgenommen werden soll.

Als auditive Wahrnehmung wird weniger der physische Hörvorgang, als mehr die Prozesse in Gehirn und Zentralem Nervensystem angesehen. Wie bereits schon erwähnt durchläuft, die Wahrnehmung eine ganze Verarbeitungskette. (*siehe dazu Abb. 2.11 auf Seite 29*) Auf ihrem Weg zum auditorischen Cortex werden die akustischen Signale, welche jetzt nach der Transduktion als elektrische Impulse codiert sind in ihre Komponenten zerlegt. In der Zentralen Hörbahn findet die Informationensweiterleitung statt.

Frequenztrennung

Die Hörbahn mündet im sog. nucleus cochlearis im verlängerten Rückenmark (*siehe (II) in Abb. 2.11 auf Seite 29*). Hier findet schon die erste Bearbeitung statt, welche laterale Inhibition genannt wird. Hierbei wird unterschieden, ob bei einem lauten Ton also eine starke Auslenkung der Basilarmembran benachbarte Haarzellen mit angesprochen wurden, welche eigentlich für andere Frequenzen zuständig sind. Dadurch werden diese Frequenzen unterdrückt und eine Frequenztrennung vorgenommen. Es findet also ein Kontrastverstärkung statt.

[1] vgl. dazu STREPP (2006) S. 31

Lokalisation, Richtungshören

Von da an verlaufen die Informationen parallel zu den OBEREN OLIVEN (*siehe (III) in Abb. 2.11 auf Seite 29*). Hier werden die Informationen beider Ohren zusammengefügt und ermöglichen somit das BINAURALE HÖREN. An dieser Stelle werden Laufzeitunterschiede der Nervenfasern, sowie Pegel- und leichte Frequenzunterschiede beider Ohren analysiert und verrechnet. Daraus entsteht dann die Richtungswahrnehmung zur Lokalisation eines Schallsignals (manchmal auch fälschlicherweise Ortung genannt). Es findet hier auch eine Filterung statt, die einen besseren Abstand zwischen Nutzsignal und Rauschen ermöglicht, um dadurch einen größeren Dynamikumfang zu schaffen.

Sprachverständnis

Im Mittelhirn, im COLLICULUS INFERIOR findet eine nochmalige Verabeitung und Verfeinerung der Informationen statt. Das binaurale Hören wird dadurch verbessert. Desweiteren findet hier eine Verstärkung „[...] von Modulation im Sprachschall”[2] statt. Das hebt die Sprachverständlichkeit bei Signalen.

Bewusstsein, Wahrnehmung

Über den Thalamus erreichen die Informationen den auditoren Cortex oder auch Hörrinde (*siehe (VII) in Abb. 2.11 auf Seite 29*). Darin findet das Bewusstsein statt. Der „Hörende” realsiert quasi erst an diesem Punkt das Gehörte.

Unterwegs passieren die Information aber noch verschiede Kerne (*siehe (IV) bis (VI) in Abb. 2.11 auf Seite 29*), welche Zwischenverbindungen zu den vegetativen Nervenzentren (VNS) haben. Diese regulieren unter anderem Blutdruck, Verdauung, Atmung, Kreislauf, etc. – also die unbewussten Körperfunktionen, die automatisch „im Hintergrund” ablaufen.

Anmerkung: *Akustische Reize können sich demnach mittelbar auf unsere Körperfunktionen auswirken und beeinflussen, bevor diese überhaupt von uns wahrgenommen werden. Es ist bekannt, dass beispielsweise dramaturgische Musik den Puls zu steigern vermag. Ein Effekt der indirekt bei Filmmusik erzielt wird und Spannung hervorruft. Aber auch das Gegenteil ist möglich. Akustische Reize können genauso den Herzschlag verringern und zu einer mittelbaren Entspannung beitragen.*

Sortierung, Kategorisierung

Nach erfolgter Sinnesverarbeitung in der Hörrinde kommt es zu INTRAMODALEN VERKNÜPFUNGEN, um einen gesamten Sinneseindruck entstehen zu lassen. Bei in-

[2] STREPP (2006) S. 45

tramodalen Verknüpfungen werden Reize hinsichtlich ihrer Quantität und Qualität bewertet. Die dadurch gewonnen Informationen werden nach Kategorien sortiert und mit bereits Gespeichertem verglichen. Wenn eine Information neu ist, dann wird diese hinzugefügt. Im Gehirn findet eine Kanalisierung statt. Dabei werden Informationen zunehmend sortiert und differenziert.

Bewertung

Die Empfindungen sind sehr subjektiv, da sie vom emotionalen System beeinflusst sind und sich beim Vergleich auf den persönlichen Erfahrungsschatz stützen. Einen ebenso großen Einfluss auf die Interpretation nehmen die Motivations-, Wachheits- und Aufmerksamkeitsteuerung bei der Beurteilung der sensorischen Informationen.

Reaktion

Nach erfolgter Verarbeitung kommt schließlich eine Reaktion auf das Wahrgenommene. Diese Informationen werden über die efferenten Nerven zurückgeleitet. Es können motorische Handlungen oder auch eine Verhaltensänderung sein.

Eine Beispiel für eine entsprechende Reaktion wird im Kapitel 5 (*„Diskrimination" auf Seite 46*) beschrieben.

Teil III

Eigenschaften des auditiven Systems (Psychoakustik)

Über Psychoakustik

In der Praxis liegt der Schwerpunkt in der Regel bei der Akustik, also der Physik. Mechanische Wellen bewegen sich durch die Luft und übertragen ihre Energie auf beeinflussbare, bewegliche Teile in unserem Ohr. Es wandelt mechanische Schwingungen in elektrische Signale um, die wiederum vom Gehirn interpretiert werden.

Bei dieser „Interpretation" setzt die Psychoakustik an. Es gibt eben doch einen deutlichen Unterschied zwischen dem Schallereignis und dem Hörereignis. Denn nicht immer ist das Empfundene (das Subjektive) dem Stattgefundenen (das Objektive) gleich. Ein Schallereignis ist technisch messbar – ein Hörereignis dagegen nicht (es wäre nur empirisch nachweisbar). Der Mensch vermag Töne zu hören, welche physikalisch nicht vorhanden sind oder einzelne Geräusche aus einem Gemisch separatisieren. Alle Leistungen sind auf die Verarbeitung im Kopf zurückzuführen.

Vereinfacht kann man sagen:

Schallreize + dadurch ausgelöste Empfindungen = Psychoakustik

Kapitel 5

5 Eigenschaften und Funktionen des auditiven Systems

Lautheit stellt die subjektiv empfundene Lautstärke dar (*für „Lautstärke" siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 15*). Ihre Beurteilung beruht auf Wahrnehmung und ist weniger technisch, als empirsch nachweisbar. Anders als die Lautstärke hängt Lautheit von verschiedenen miteinander korrelierten Werten ab. Sehr wichtig für die empfundene Lautstärke ist der Frequenzgang eines Signals. Das Lautstärkeempfinden ist nämlich alles andere als linear. Wir Menschen nehmen die Lautheit je nach Frequenz unterschiedlich stark wahr. Das bedeutet, dass bei gleichbleibender technischer Lautstärke die empfundene Lautheit des Signals, abhängig von der Frequenz unterschiedlich laut empfunden wird.

Jeweils zwei Wissenschaftler Harvey Fletcher und Wilden A. Munson (1933), sowie Robinson und Dadson (1956)[1] haben die Kurven gleicher Lautstärke (*siehe Abb. 5.1 auf der nächsten Seite*) mittels Hörtests an verschiedenen Probanten empirisch ermittelt. Die Kurven stellen einen repräsentativen statistischen Schnitt des menschlichen Hörvermögens dar.

[1] vgl. WEINZIERL (2008) S. 55

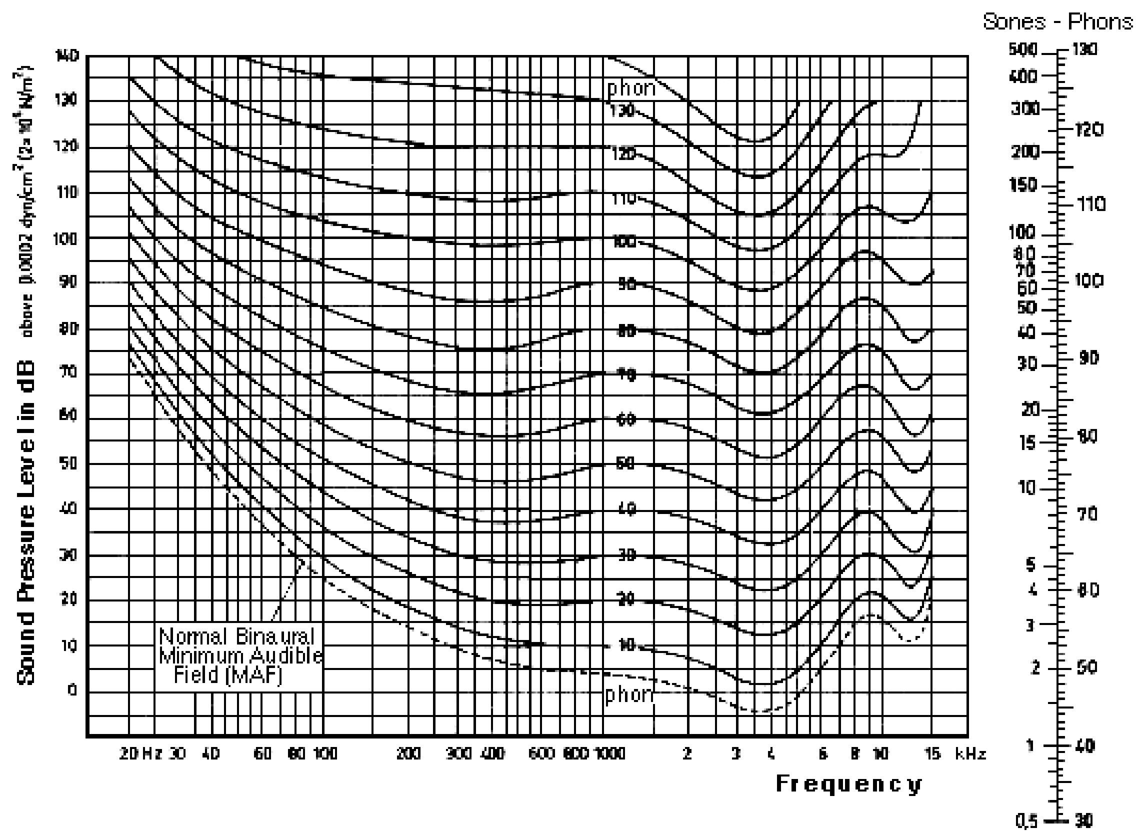


Abb. 5.1: Kurven gleicher Lautstärke [Quelle: S.61]

Die Einheiten sind sowohl in Dezibel, als auch in PHON und SONE angegeben.

PHON stellt die empfundene Lautstärke im Verhältnis zu 1kHz (als Sinuston) dar. Das bedeutet, dass bei 1kHz dB und Phon identisch sind. SONE dagegen stellt die tatsächlichen frequenzabhängigen Lautheitsverhältnisse von verschiedenen Lautstärkepegeln eines Signals zueinander dar. Als 1 sone werden 40 phon bei 1kHz definiert. Das doppelt so laute Signal wird bei 50 phon mit 2 sone empfunden. [2] Eine Pegelverdopplung bei einem dB Wert würde aber nur 6dB betragen. Bei jeder weiteren Verdopplung der Lautheit (sone) steigt die Lautstärke (phone) nur um 10 phon. Das Verhältnis zwischen Phon und Sone ist wie folgt in Abb. 5.2 auf der nächsten Seite dargestellt.

[2] vgl. DICKREITER (1997) S. 113

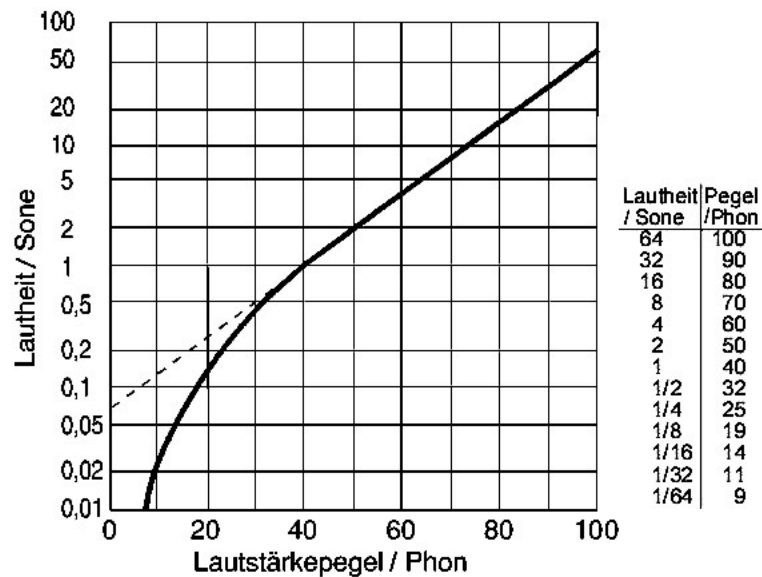


Abb. 5.2: Phon-Sone-Verhältnis [Quelle: S.61]

Hörschwelle und Schmerzschwelle

Das Ohr benötigt einen sog. Mindestschalldruck, damit die Haarzellen überhaupt in Bewegung versetzt werden können. Dieser beträgt bei 1kHz ca. $2 \cdot 10^{-5} Pa$ ($20 \mu Pa$) und stellt die menschlich Hörschwelle dar. Lautstärken bzw. Schalldrücke, die darunter liegen, also leiser sind können von uns Menschen nicht mehr wahrgenommen werden. Das Gehör kann allerdings nicht unbegrenzt belastet werden. Ab 20 Pa wird die Lautstärke als schmerzhaft empfunden. Das entspricht etwa $120 dB_{SPL}$. Schalldrücke jenseits dieser Werte können zum unmittelbaren Bruch der Gehörknöchelchen führen, sowie weitere Schädigungen des Innenohres nach sich ziehen.

Die Schmerz- bzw. Hörschwelle stellen als Begrenzungen die untere und oberen Kurven in Abb. 5.1 (*auf der vorherigen Seite*) dar. Der Bereich zwischen $20 \mu Pa$ und $20 Pa$ repräsentiert den DYNAMIKUMFANG unseres Gerhörs.

Tondauer / Intgration Für die Bestimmung der Lautstärke ist die Zeit der Einwirkung relevant. Innerhalb von 100ms - 200ms[3] nimmt die Lautstärke zu. Das wird ZEITLICHE INTEGRATION” genannt. Wird die Dauer eines Tons 10fach erhöht, so wächst die Lautstärke um 10dB an. Das gilt allerdings nur innerhalb dieser Integrationszeit. Außerhalb bleibt die Lautstärke auch bei längerer Schalleinwirkung konstant.

Anmerkung: *In mehreren anerkannten Fachbüchern exitieren jeweils unterschiedlich Angaben über die Dauer der Integrationszeit. Es ist anzunehmen, dass dies von Mensch zu Mensch unterschiedlich ist. Der Wert bewegt sich aber zwischen 100 - 200ms.*

[3] siehe WEINZIERL (2008) S. 60 und FRIESECKE (2007) S. 129

Maskierung oder auch Verdeckung stellt beim Gehör das Nichtwahrnehmen von Schallreizen oder Teilen eines Signals unter bestimmten Bedingungen dar. Gerade sehr kurze transientenreiche Signale sind davon betroffen, weil das Gehör dafür zu träge ist. Genauso tritt dieser Effekt gegenüber lauten und leisen Signalen auf. Es wird davon gesprochen, dass das leise Signal von einem dominanten Signal maskiert wird.[4] Je lauter, desto länger dauert die Erholungsphase und somit die Zeit, in der andere Signale verdeckt werden.

Die FREQUENZIELLE MASKIERUNG ist am stärksten wahrnehmbar. Hierbei verdecken sich Signale, die sich in gleichen oder benachbarten Frequenzbereichen befinden. Auch hier gilt: das laute Signal dominiert das leise. Hohe Frequenzen sind am stärksten betroffen, da sie weniger Energie haben.

Maskierung oder auch Masking (en.) ist Prinzip, das unter anderem zur Datenreduktion bei Audiocodecs verwendet wird.

Erkennung von Frequenzen In der Natur gibt es praktisch keine reinen Sinustöne. Darum ist alles was wir hören ein Klang oder sogar ein Klanggemisch. Klänge bestehen, anders als Sinustöne aus mehreren harmonischen Schwingungen. Sie stellen also ein Gemischen aus diesen Schwingungen dar. Alle Frequenzen stellen ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz eines Grundtons dar. Der Grundton definiert die empfundene Tonhöhe eines Klanges. Um die Tonhöhe exakt zu bestimmen muss dieser Grundton vom auditven System erkannt werden. Es wird daher nach periodischen Wiederholungen im Schwingungsverlauf des Klangs „gesucht". Die längste Periodendauer definiert dann den Grundton.

Es kann aber sein, dass ein Grundton einmal nicht erkannt wird. Dazu hat das auditive System einen Ausweichmechanismus namens „Residualton"

Residualton Der Begriff leitet sich von „Residuum" (lat.) ab – das bedeutet soviel „Rest". Der Residualton oder Residualeffekt beschreibt ein Phänomen bei dem das Gehör physisch nicht emittierte Frequenzen hören kann. Dies funktioniert aufgrund der Obertonstruktur von Klängen. Fehlt der Grundton eines Klangs, kann das Gehör ihn nachbilden. Dabei wird in der Obertonstruktur (Partialtöne) nach Wiederholungen abgesucht. Relevant sind dabei die erste und zweite Harmonische. Aus ihnen kann das auditive System den fehlenden Grundton erzeugen und wahrnehmen.[5] Dieser Effekt erlaubt selbst unter Maskierung (*siehe dazu „Maskierung" auf dieser Seite*) Grundtöne

[4]vgl. MEYER (2002) S. 262
[5]vgl. dazu FRIESECKE (2007) S. 120

wahrzunehmen. Genauso wichtig ist der Effekt bei Telefonen, die nur Frequenzen von etwa 300Hz - 3,5kHz übertragen.

Lokalisation Zunächst muss einmal der Unterschied zwischen Lokalisation und Ortung getroffen werden:

- Lokalisation ist das Bestimmen einer Richtung, aus der z.B. ein Schallreiz kommt.
  Man lokalisiert entfernte Objekte.
- Ortung stellt die Bestimmung der eigenen Position dar.
  Man ortet den eigenen Standort.

Im Folgenden soll für uns aber allein die Lokalisation relevant sein. Die Lokalisation ist eine Intepretation des auditiven Systems aus mehren Faktoren. Dabei werden

1. Laufzeitdifferenzen
2. Reflexionen an den Ohrmuscheln (*siehe „Ohrmuschel", Kapitel 2.1.1 auf Seite 17*)
3. Frequenzänderungen, Klangfärbungen
4. Pegelunterschiede

zwischen beiden Ohren analysiert und verglichen. Der Prozess findet in den Oberen Oliven des Gehirns statt (*vgl. dazu „Lokalisation, Richtungshören", Kapitel 4 auf Seite 37*) Lokalisation erfolgt in mehreren Ebenen.

Die Richtungswahrnehmung in der Horizontalebene (XZ-Ebene) erfolgt hauptsächlich über (1.) und (4.). Dabei können Signale zwischen links-rechts und hinten-vorne unterschieden werden. Möglich ist dies, da ein Signal nie zeitgleich an beiden Ohren eintrifft. Ein Ohr hört das Signal immer schon früher, als das andere. Aus dem Zeitdifferenz stellt das auditive System eine Entfernung und eine Richtung fest.

In der Medianebene (YZ-Ebene) wird vor allem die Höhe oder auch „Elevation"[6] eines Schallsignals ermittelt. Hier wird der Unterschied zwischen oben-unten, aber auch zwischen hinten-vorn getroffen. Dies beruht hierbei hauptsächlich auf Reflexionen (2.) und spezifische Klängfärbungen (3.). Laut FRIESECKE (2007) kann die Richtung auf 10° exakt bestimmt werden.

[6] siehe FRIESECKE (2007) S. 134

Diskrimination (lat.: discriminare; de.: trennen) versteht sich als „rein passiver Anregungsprozess"[7] des Innenohrs auf einen Schallreiz. Es wird die Empfindlichkeit gegenüber niedrigen Schalldruckpegeln angepasst. Dadurch wird eine indirekte Verstärkung und eine höhere frequenzielle Trennschärfe realisiert. Der Prozess findet auch wieder in den Oberen Oliven statt. Das Signal gelangt über die afferenten Nervenleitungen an das Gehirn (Obere Oliven). Das Reaktionssignal wird per efferente Nervenbahnen an die äußeren Haarzellen gesendet, die daraufhin ihre Sensibilität ändern. So kann bei niedrigen Pegeln wieder ein klar definiertes Amplitudenmaximum detektiert werden.

Lautmustererkennung ist das „[...] Einordnen des Gehörten in Bekanntes und Vertrautes."[8] Dabei handelt sich hauptsächlich um einen Vergleichs- und Bewertungsprozess. Das wahrgenommene Reizmuster wird mit dem des Langzeitgedächtnisses abgeglichen. Obwohl am Trommelfell ein wildes Gemisch von komplexen Schallen eintrifft, das sogar von verschiedenen Quellen stammen kann, vermag das auditive System daraus „definierte auditive Objekte"[9] zu erkennen. Zwei unterschiedliche Musikinstrumente können zwar rein frequenziell den gleichen Ton (Tonhöhe) spielen, dennoch sind sie völlig unterschiedlich in ihrer klanglichen Erscheinung. Verantwortlich dafür ist die spezifische Obertonstruktur eines jeden Klangerzeugers. Es wird vom spezifischen Formantenspektrum[10] gesprochen. Dieses wird vom auditiven System spektral analysiert. Die Obertonstruktur eines Instruments, einer Stimme oder eines gemeinen Klanges haben ein ganz individuelles Muster, ähnlich eines Fingerabdrucks. Es folgt eine Erkennung durch das auditive System, mit anschließenden Musterabgleich.

Zeitliche Mustererkennung ist ähnlich wie bei der spektralen Mustererkennung ein Analyseprozess. Das Stichwort hierfür ist die spezifische Hüllkurve von Schallsignalen, insbesondere bei musikalischen Klängen. Jeder Klang hat 3–4 Phasen, die ihn zeitlich definieren:

- Attack – Phase des Pegelanstiegs
- (Decay – rascher Abfall nach der Attackphase)
- Sustain – Phase mit gleichbleibender Lautstärke
- Release – Phase des Ausklingens, bis zur Stille

[7] siehe FRANZEN (2001) S. 8
[8] siehe STREPP (2006) S. 51
[9] siehe WEINZIERL (2008) S. 67
[10] vgl. GRUHN (2005) S. 18

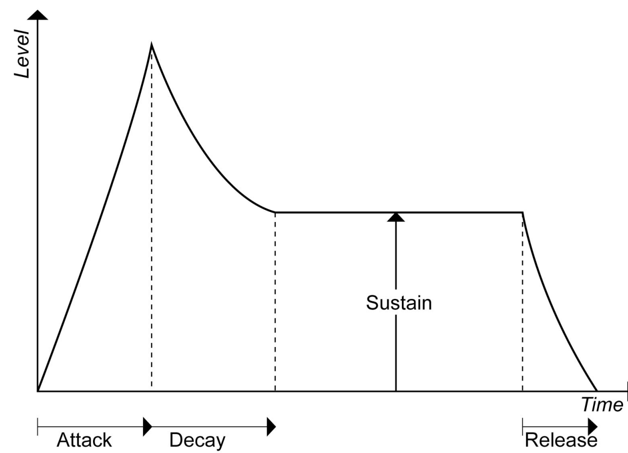


Abb. 5.3: ADSR-Hüllkurve

Die Decay-Phase existiert nicht unmittelbar nach dem Attack. Ferner kann die Attackphase sogar gleich in die Sustain-Phase übergehen.

6 Kapitel 6
Auditive Paradoxen, akustische Täuschungen & psychologische Effekte

„Wie uns das Ohr übers Ohr haut"

Wie auch bei der Optik unterliegt die auditive Wahrnehmung einer Interpretation des Gehirns. Und analog zur Optik lässt sich dieser Sinn täuschen, umgehen und beeinflussen. Im folgendem Kapitel werden einmal kurz einige Beispiele dafür aufgezeigt.

Anmerkung: *Für einige Themen dieses Kapitels sind Hörbeispiele auf Seite 61 vorhanden An den entsprechenden Stellen wird dann explizit darauf hingewiesen.*

6.1 Shepard-Skala

[Hörbeispiel #1]

Bei der Shepard-Skala handelt es sich um eine akustische Illusion, welche nach Roger Shepard, einem amerikanischen Akustiker benannt wurde. Die Skala täuscht eine parmanent abfallende bzw. aufsteigende Tonleiter vor. Es handelt sich um einen sogenannten „Zirkulareffekt"[1] Ein Auftreten ist beim Vorhandensein mehrerer Sinustöne beobachtbar. Wenn deren Frequenz langsam ansteigt, und diese langsam durch eine verzögerte Lautstärkefluktuation einander ablösen, entsteht der Eindruck, dass sich die Tonleiter unendlich fortsetzt. Der Versatz muss dabei eine Oktave betragen. Dabei fungiert der endende, letzte Ton der Skala als eine Art Oberton des neu startenden Tons. Dieser Zyklus ließe sich nun unendlich weit fortsetzen. Eine schöne schematische Visualisierung der Problematik stellt Abb. 6.1 dar.

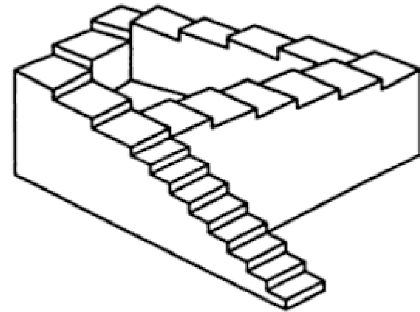


Abb. 6.1: `Perspektivtäuschung [ TERHARDT (1998) S.376]`

Im *Hörbeispiel #1* (auf Seite 61) soll dies näher verdeutlicht werden.

6.2 Tritonus-Paradoxon

[Hörbeispiel #2]

Beim Tritonus handelt es sich um ein Intervall - eine übermäßigen Quarte bzw. verminderten Quinte (z.B. C – Fis), bestehend aus drei Ganztonschritten. Dieses Intervall unterteilt eine Oktave in drei gleich große Teile. Die Abstände sind also immer gleich. Nun wird dieses Intervall mehrfach dargeboten, mit jeweils alternierenden Anfangstönen. Je nach Hörer kann das Intervall als ein aufsteigendes, aber auch als ein absteigendes interpretiert werden. Die Wahrnehmung ist je nach Person verschieden.

[1] siehe GRUHN (2005) S. 18

6.3 Phantomschallquelle

Dieser Effekt ist eher unter dem Namen Stereofonie bekannt. Darunter wird die Lokalisation eines Schallereignisse verstanden, das sich reel garnicht an dem Ort befindet, an dem es wahrgenommen wird.

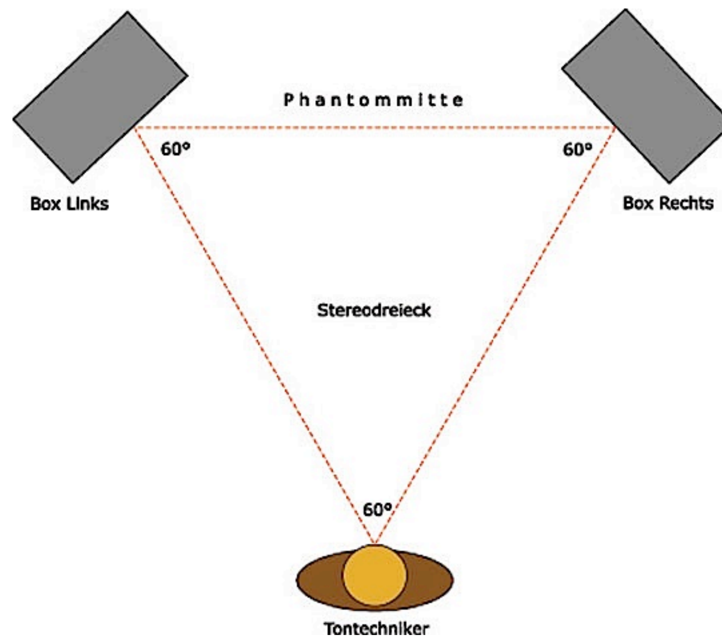


Abb. 6.2: `Stereodreieck [Quelle: S.61]`

In unserem Beispiel - eine Darstellung als ideales Stereodreieck (*Abb. 6.2*) - sind zwei Lautsprecher vorne links und rechts zur Abhörposition aufgestellt. Wenn ein Schallsignal jetzt von beiden Lautsprechern mit dem gleichen Pegel gleichzeitig wiedergegeben wird, so hört der Probant nicht etwa zwei separate Schallereignisse von links und rechts vorn, sondern ein einziges, das scheinbar in der Mitte zwischen beiden Lautsprechern positioniert ist. Beide Lautsprecher erzeugen eine sogenannte Phantomschallquelle. Je nachdem, ob einer der Lautsprecher ein leiseres oder lauteres Signal in Bezug zu dem anderen emittiert, wandert die Phantomschallquelle in der Phantommitte (entlang der Achse) zwischen den beiden Lautsprechern hin und her.

Die Ursache dafür ist das Zusammenführen gleicher Signale und deren Laufzeitanalyse in den Oberen Oliven (*siehe S.37*), welche das Gehirn als Lokalisation eines einzigen Schallereignisses interpretiert.

6.4 Cocktailparty-Effekt

Dieser Effekt bezieht sich grundlegend auf die Lokalisationseigenschaft (*siehe dazu „Lokalisation" auf Seite 45*), aber auch die Musterekennung (*S. 46*) des auditiven Systems.

Angenommen wird, dass in einer Umgebung mit sich komplex überlagernden Schallereignissen keine Separatisierung und Differenzierung einzelner Schallobjekte technisch möglich ist. Ähnlich, wie bei einer Cocktailparty (daher der Name), bei der ein wildes Durcheinander vieler Gespräche vorherrscht und ein undefiniertes Hintergrundgeräusch produziert.

Was technisch schwer lösbar ist, vermag jedoch das auditorische System. Unser Hörapparat kann mit Hilfe der Lautmustererkennung spezifische auditorische Objekte aus dem Hintergrundgeräusch „herauslösen" und sie konkret lokalisieren. (im unserem Beispiel: Verfolgung einzelner Gespräche aus dem Hintergrundrauschen heraus) Voraussetzung dafür ist Konzentration beim Hören, das auf Dauer geistig anstrengend werden kann. Es findet eine aktive Musterverfolgung statt. Die Unterschiede zwischen beiden Ohren erlauben dessen Lokalisation. Beide Ohren sind für diesen Effekt notwendig, da ständig ein Abgleich des erkannten Musters zwischen beiden Ohren geschieht. Fehlt das Signal einer Ohrseite, so verschwindet auch der Effekt.[2]

6.5 Synästhesie

Unter Synästhesie wird das Vermischen von Sinnesebenen verstanden. In anderen Worten heißt das „[...] Auge und Ohr beeinflussen sich gegenseitig"[3]. Die Reize vermischen sich und es entsteht ein neues Gesamtbild. Es entstehen neue Klang- und Bilder-Assoziationen. Stichwort: Audiovisualität. In Kombination wirken sich diese Reize intensiver emotional auf uns aus, als wenn sie seperat dargeboten werden.[4] Ein Effekt der bei Liveshows zu beobachten ist. Konzerte sind bei weitem nicht so spektakulär, wenn ein entsprechender visueller Reiz (Licht-, Videoshow) fehlt. Genauso ist es auch umgekehrt. Weitere Anwendung findet sich in der Werbepsychologie. Markante akustische Reize (Jingles) werden mit einer Marke in Verbindung gebracht, um ein stärkeres Bewusstsein dafür zu bilden. (Audiobranding)

[2] vgl. FRIESECKE (2007) S. 136
[3] siehe WERNER (2006) S. 122
[4] vgl. GRILLPARZER (2006) S. 87

7 Kapitel 7

Störung & Beeinträchtigung der auditiven Wahrnehmung

In diesem Teil soll einmal kurz abhandeln was passiert, wenn das auditve System oder Teile davon ihren Dienst verweigern. Beispielhaft werden einige Behinderungen und deren Auswirkung dargestellt.

7.1 Otosklerose

Unter einer Sklerose wird allgemein eine Verhärtung von Gewebe verstanden, welche durch Vermehrung des betroffenen Bindegewebes hervorgerufen wird.

Bei der Otosklerose kommt es zu einer krankhaften Knochumbaubildung des Labyrinthknochens. Dabei ist speziell das ovale Fenster relvant. Hier kommt es zu einer Fixierung der Stapelfußplatte des Steigbügels (*siehe dazu „Steigbügel" auf Seite 24*). Infolge dessen ist die Schwingungsweiterleitung behindert bzw. vollkommen gestört. Das Resultat ist Schwerhörigkeit bzw. Taubheit.

Anzumerken ist, dass die Schwerhörigkeit auf der mechanischen Ebene des Hörvorganges stattfindet - auch Schallleitungsschwerhörigkeit genannt. Diese Form der Schwerhörigkeit ist operabel. Durch Entfernen der Fußplatte und Anbringung einer Prothese, aber auch durch Perforation der Fußplatte mittels Laser ist das Hörvermögen teilweise bzw. ganz wieder herstellbar.[1]

[1] vgl. FRANZEN (2001) S. 45 f

7.2 Hörsturz

Bei einem Hörsturz tritt in der Regel innerhalb weniger Sekunden eine kochläre Schwerhörigkeit bis Vertaubung auf. Betroffen ist meistens nur eine Seite des Gehörs. Bei einer Vollständigen Ertaubung spricht man von „sudden deafness" In 30% der Fälle tritt ein Tinitus in Erscheinung.

Der Hörsturz ist als akute Funktionsstörung des Innenohres deklariert. Zurückzuführen ist dies auf eine Zirkulationsstörung des Endolymphsystems, aber auch eine Durchblutungsstörung des Innenohrarterie, beispielsweise durch Thrombusbildung oder spastischen Verschluss (krampfartig).

Bei einer Therapie werden in der Regel blutverdünnende Maßnahmen (Infusionstherapie) eingeleitet. Die Wahrscheinlichkeit einer Spontanheilung des Gehörs liegt auch ohne Infusion bei 80%.[2]

Bei dieser Art von Schwerhörigkeit handelt es sich *nicht* um Schallleitungsschwerhörigkeit, sondern um kochläre Schwerhörigkeit. Es ist der „Schallwandler" direkt betroffen.

7.3 Altersschwerhörigkeit

Altersschwerhörigkeit (lat. Presbyakusis) stellt eine degenerative Hörminderung des Innenohres dar. Eine Rolle dabei spielt sowohl die NEKROSE (Absterben) von Haarzellen, als auch eine Versteifung der Basilarmembran.

Dabei tritt progressiver Hochtonabfall und Diskriminationsverlust (*siehe dazu "Diskrimination" auf Seite 46*) auf. Durch Verlust der Trennschärfe, wird die Dynamik des Ohres kleiner. Feine und leise Geräusche sind schlechter hörbar.[3] Der Höhenabfall beträgt durchschnittlich 1kHz pro 10 Jahre.[4] Ein deutliches Auftreten ist ab dem 50. Lebensjahr bemerkbar. Ein Höhenabfall beginnt aber schon mit dem 30. Lebensjahr.

Dieser Prozess ist in der Regel nicht aufzuhalten, da das Ohr bei jedem irgendwann „verschleißt". Jedeglich der Grad der Auswirkung ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Wenn die Schwerhörigkeit schon soweit fortgeschritten ist, dass Hörhilfen appliziert werden müssen, kann ein Hörtraining den Prozess verlangsamen.

[2] vgl. FRANZEN (2001) S.54
[3] vgl. FRANZEN (2001) S. 56
[4] vgl. FRIESECKE (2007) S. 116

Allgemein

Verallgemeinert lässt sich feststellen, dass alle herzschädigenden Faktoren auch potentiell für das Gehör gefährlich sind. Ein Übermaß an Fett, Zucker, Alkohol oder Nikotin führt zu Durchblutungstörungen. Die Haarzellen im Ohr werden von winzigen Blutgefäßen versorgt. Infarkte und infolge dessen Nekrosen der Sinneshärchen sind nicht unwahrscheinlich. Wie wir in Kapitel 7.3 sehen konnten, nimmt die Anfälligkeit dafür mit fortschreitenden Alter stetig zu.

Gesunde Ernährung und Maßhaltung würden sich also nicht nur positiv auf das Herz-, Kreislaufsystem, sondern auch auf unser Ohr auswirken.[5]

[5] vgl. GRILLPARZER (2006) S. 124

Zusammenfassung

Dem gemeinen Tontechniker sind viele der Fakten dieser Arbeit sicherlich kein absolutes Novum. Dennoch sollte auch der unbedarfte Leser nicht völlig ausgeschlossen werden.

Diese Diplomarbeit hat ein sehr breit gefächertes Themenfeld zur Ausarbeitung. Jedem einzelnen Bereich stünde eigentlich eine separate Abhandlung zu. Das war in diesem Rahmen leider nicht möglich. Aufgrund dessen konnte auf einige Bereiche nicht intensiver eingegangen werden. Das ist leider etwas bedauerlich, da sicherlich noch nicht alles zu den Themen gesagt ist. Bei den physikalischen Grundlagen (*Kapitel 1.2 auf Seite 5 ff*) wurde der Umfang auf die Bereiche beschränkt, die für ein späteres Verständnis der Physiologie beim Gehör notwendig sein soll. Es war dem Autor wichtig nicht ein allumfassendes Werk zu verfassen (das hätte den Rahmen gesprengt), sondern es sollten nur die Informationen für die Arbeit verwendet werden, welche auch für den weiteren Verlauf relevant sind. Viele der Punkte sind thematisch miteinander verknüpft. An entsprechenden Stellen wurden Querverweise zu den weiterführenden Teilen eingebracht.

Da weder die zu erwartende Leserschaft, noch der Autor selbst (trotz eventuell schon vorhandener Vorkenntnisse) Absolventen eines höheren Medizin-, Physik- oder Psychologiestudiums sind, wurde sich darum bemüht möglichst allgemeinverständliche Fachbegriffe zu verwenden und überflüssige lateinische Bezeichnungen zu vermeiden.

Im Großen und Ganzen konnte eine gute Übersicht über die angestrebte Thematik dargestellt werden. Grundlegende Begriffe aus Physik, Biologie, Psycho- und Neurologie wurden aufgezeigt und näher erläutert. Dabei wurde sehr nah an der Fachliteratur recherchiert und argumentiert.

Für weiterführende und umfassendere Informationen, welche die Schwerpunkte dieser Arbeit betreffen, werden die für diese Arbeit konsultierten Werke (*siehe S.58 f*) zur Lektüre empfohlen.

persönliches Fazit des Autors

Am Anfang gab es die Befürchtung, die zu erwartende Mindestwortzahl nicht erfüllen zu können. Umso erfreulicher ist jetzt, dass das Soll mehr als erfüllt ist. Es mussten sogar Themen ausgespart werden, welche dem Autor als weniger relevant erschienen, um an wichtigen Punkten tiefer ins Detail gehen zu können.

Wunsch des Autors ist es ein stärkeres Bewusstsein und Verständis für auditive Wahrnehmung und die dazugehörige Apparatur zu schaffen. Aus persönlich Erfahrung lässt sich sagen, dass der Mensch eher ein visueller Typ ist. Beeindruckt werden Menschen eher von dem was sie sehen, als von dem was sie hören. Auditive Ereignisse werden von einer Großzahl der Menschen nur passiv, d.h. unbewusst wahrgenommen und sind für sie sekundär relevant.

In einer Zeit (Stand: 04/2009), in der MP3s schon sämtliche Bereiche der Audiobranche erobert haben, scheint das ästhetische Empfinden der Menschen stetig zu sinken. (Dabei wird vom groben Schnitt der Bevölkerung ausgegangen) Manche Menschen scheinen sich schon gar nicht mehr an der schlechten, artefaktproduzierenden Qualität solcher Aufnahmen zu stören.

Ein weiterer Punkt ist die Desensibilisierung gegenüber hohen Lautstärken. Auf Konzertveranstaltungen oder beim MP3-Player ist eine zunehmende Abhörlautstärke beobachtbar. Es herrscht allgemeines Unbewusstsein über den Schaden, welchen Menschen sich dabei persönlich über lange Sicht zufügen, wenn sie sich permanent diesen starken Schalldruckpegeln aussetzen. Tendenz steigend.

Vielleicht kann diese Arbeit ja auch einen kleinen Teil zur Aufklärung beitragen. Wünschenswert wäre es, wenn Audio wieder zur einer anderen, einer neuen Normalität zurückfinden würde.

Aber was ist schon normal und... wer bestimmt, was normal ist?

\- - -

Empfindet nicht ein jeder Normalität auch ein bisschen anders?

Teil IV

Quellen, Anhang

Literaturverzeichnis

BERTELSMANN. *Bertelsmann Lexikon (Bd. 11).* Bertelsmann Lexikothek Verlag, Gütersloh, 1989. ISBN 3-570-03891-2.

JOACHIM-FELIX LEONHARD; ARMIN BURKHARDT; GEROLD UNGEHEUER; HERBERT ERNST WIEGAND; HUGO STEGER; KLAUS BRINKER. *Handbücher zur Sprach- und Kommunikationswissenschaft.* Walter de Gruyter, 2001. ISBN 3-11-016326-8.

ERNST FLORENS FRIEDRICH CHLADNI. *Die Akustik.* Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1802.

MICHAEL DICKREITER. *Handbuch der Tonstudiotechnik Bd.1.* K.G. Saur Verlag KG, München, 1997. ISBN-3-598-11322-8.

ACHIM FRANZEN. *Hals-Nasen- und Ohrenheilkunde.* Elsevier GmbH Deutschland, 2001. ISBN-3-437-42960-4.

ANDREAS FRIESECKE. *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker.* K.G. Saur Verlag KG, München, 2007. ISBN 3-598-11774-4.

MARION GRILLPARZER. *Körperwissen: Entdecken sie ihre innere Welt.* Gräfe und Unzer Verlag GmbH, München, 2006. ISBN-3-8338-0221-9.

WILFRIED GRUHN. *Der Musikverstand: Neurobiologische Grundlagen des musikalischen Denkens, Hörens und Lernens.* Georg Olms Verlag, 2005. ISBN 3-487-12883-7.

ARNDT VON LÜPKE HEINZ HOFFMANN. *0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel.* Schmidt Erich Verlag, 1993. ISBN 3-503-03432-3.

WALTER HOPPE. *Biophysik.* Springer Verlag, 1982. ISBN-3-540-11335-5.

WOLF D. KEIDEL. *Physiologie des Gehörs.* Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1975. ISBN 3-13-513201-3.

NATHALIE LUPBERGER. *Auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörung im Kindesalter.* Schulz-Kirchner Verlag GmbH, 2007. ISBN-978-3-8248-0311-8.

HORST OTTO MAYER. *Einführung in die Wahrnehmungs-, Lern- und Werbepsychologie.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005. ISBN-3-486-57675-5.

MARTIN MEYER. *Kommunikationstechnik*. Vieweg Verlag, 2002. ISBN-3-528-13865-3.

MEYERS-LEXIKON-21. *Meyers Enzyklopädisches Lexikon Bd. 21*. Biliographisches Institut, Mannheim/Wien/Zürich, 1981.

MEYERS-LEXIKON-4. *Meyers Enzyklopädisches Lexikon Bd. 4*. Bibliographisches Institut, Mannheim/Wien/Zürich, 1981.

MICHAEL MÖSER. *Technische Akustik*. Springer Verlag, 2004. ISBN-3-540-22510-2.

JOSEF F. BILLE; WOLFGANG SCHLEGEL. *Medizinische Physik 1: Grundlagen*. Springer Verlag, 1999. ISBN 3-540-65253-1.

WALTER SEIBT. *Physik für Mediziner*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 5. unveränderte auflage edition, 2003. ISBN 3-13-113235-3.

WILHELM STAUDER. *Einführung in die Akustik*. Heinrichshofen's Verlag, Wilhelmshaven, 1973. ISBN 3-7959-0121-9.

MICHAEL STRAUSS. In *Seminararbeit: Mehrkanal-Wiedergabetechniken*. Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2001.

KAI STREPP. *Auditive Wahrnehmungsstörungen im schulrelevanten Kontext*. GRIN Verlag, 2006. ISBN 978-3-638-71025-1.

ERNST TERHARDT. *Akustische Kommunikation*. Springer Verlag, 1998. ISBN-3-540-63408-8.

ROBERT F. SCHMIDT; FLORIAN LANG; GERHARD THEWS. *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie*. Springer Verlag, 2005. ISBN 3-540-21882-3.

REGINA OEHLER KARL-HEINZ WELLMANN VOLKER BERNIUS, PETER KEMPER. *Der Aufstand des Ohrs - die neue Lust am Hören: Reader neues Funkkolleg*. Vandenhoeck & Ruprecht, 2006. ISBN-3-525-49095-X.

STEFAN WEINZIERL. *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, 2008. ISBN 3-540-34300-8.

HANS U. WERNER. *Soundscape-Dialog: Landschaften und Methoden des Hörens*. Vandenhoeck u. Ruprecht, 2006. ISBN-3-525-48005-9.

weitere Quellen

- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Ear-anatomy.png
  Stand: 17.11.08 (Abb. 1.5 auf Seite 14)
- URL: http://positron.physik.uni-halle.de/VVB/Dias/Mechanik/Dia_M26.gif
  Stand: 23.07.08 (Abb. 1.1 auf Seite 6)
- URL: http://positron.physik.uni-halle.de/VVB/Dias/Mechanik/Dia_M25.gif
  Stand: 23.07.08 (Abb. 1.1 auf Seite 6)
- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Wellenlaenge.png
  Stand: 23.07.08 (Abb. 1.2 auf Seite 8)
- URL: http://www.matheplanet.com/matheplanet/nuke/html/uploads/4/2796_4-3 -schall-schwebung_ende1.png
  Stand: 31.07.08 (Abb. 1.4 auf Seite 12)
- URL: http://www.matheplanet.com/matheplanet/nuke/html/uploads/4/2796_4-3 -schall-schwebung_ende2.png
  Stand: 31.07.08 (Abb. 1.4 auf Seite 12)
- URL: http://www.dombrowsky.ch/images/ohrmuschel1.jpg
  Stand: 01.08.08 (Abb. 2.2 auf Seite 17)
- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/f/f6/Doppelspalt-interferenz.png
  Stand: 01.08.08 (Abb. 1.3 auf Seite 10)
- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Doppler_effect.jpg
  Stand: 01.02.09 (Abb. 1.5 auf Seite 14)
- URL: http://i.onmeda.de/innenohr.gif
  Stand: 14.01.09 (Abb. 2.6 auf Seite 25)

- URL: http://www.tz-wien.at/Informationen/Bilder/cochlea.jpg
  Stand: 03.03.09 (Abb. 2.7 auf Seite 26)
- URL: http://www.tz-wien.at/Informationen/Bilder/haarzellen.jpg
  Stand: 03.03.09 (Abb. 2.8 auf Seite 27)
- URL: http://www.kinderwelt.org/grafik/reise_ins_ohr_b2.gif
  Stand: 03.03.09 (Abb. 2.3 auf Seite 18)
- URL: http://www.sinnesphysiologie.de/gruvo03/gehoer/wander.jpg
  Stand: 10.03.09 (Abb. 3.2 auf Seite 32)
- URL: http://www.vettaville.nl/div/Fletcher%20munson%20Phon%20fig%203.gif
  Stand: 21.03.09 (Abb. 5.1 auf Seite 42)
- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/c/c7/Akustik_phon2sone3.jpg
  Stand: 22.03.09 (Abb. 5.2 auf Seite 43)
- URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Example_Shepard_Tones.ogg
  Stand: 29.03.09 (Hörbeispiel 1 [S.49])
- URL: http://philomel.com/mp3/musical_illusions/Tritone_paradox.mp3
  Stand: 29.03.09 (Hörbeispiel 2 [S.49])
- URL: http://www.gccarstensen.com/assets/images/wsstereo-stereodreieck.jpg
  Stand: 30.03.09 (Abb. 6.2 auf Seite 50)

Anhang

Index

über diese Arbeit

verwendete Software:	LYX 1.5.3
	LATEXiT 1.12.0
	BibDesk 1.3.5
	TexShop 2.10
Wortzahl:	11.430

(nicht mitgezählt: Titelblatt, Verzeichnisse, Querverweise, Fußnoten, Index, Quellen, Anhang)

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage dem Institute Leipzig eingereichte Diplomarbeit vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Leipzig, den 03. Apr. 2009

Benjamin E.G. Gruber